前　　言

本标准的第三篇(第10章～第13章)是推荐性的,其余为强制性的。

本标准等同采用国际电工委员会标准IEC 60825-1:1993《激光产品的安全　第1部分:设备分类、要求和用户指南》第一版和1997年9月的第1次修改单。

本标准是修订原国标GB 7247—1995《激光产品的辐射安全、设备分类、要求和用户指南》(idt IEC 60825—1984和1990年8月的第1次修改单)。本标准与GB 7247—1995相比主要变化见下表:

章　号	增　加	修　改	删除
1	发光二极管(LED)的内容		
3	12个定义	4个定义	1个定义
4	4.11～4.14	4.2.1;4.3.1;4.6	
5	5.12	5.2	
6		6.1	
7		7.1;7.2	
8		8.1;8.2c),f)～h),j)	
9		9.2;9.3d),e);9.4c)	
10		6;10.7;10.8.3;10.9	
11	11.1 d);11.5	11.3	
12		12.5.3	
13	13.5	13.2;13.3;13.4	
其他	附录E,附录F	表1～8;图6～8,10,11,13;附录A,附录C	

本标准从实施之日起,代替GB 7247—1995。

本标准的附录A、附录B、附录C、附录D、附录E、附录F都是提示的附录。

本标准由中华人民共和国信息产业部提出。

本标准由中国电子技术标准化研究所归口。

本标准起草单位:中国电子技术标准化研究所。

本标准主要起草人:梁秀荣、张越、张桂素、徐大刚。

本标准于1987年首次发布,1995年第一次修订。

IEC 前言

1）IEC（国际电工委员会）是由各国家电工委员会（IEC 国家委员会）组成的世界性标准化组织。IEC 的目的是促进电工电子领域标准化问题的国际合作。为此目的，除其他活动外，IEC 发布国际标准。国际标准的制定由技术委员会承担，对所涉及内容关切的任何 IEC 国家委员会均可参加国际标准的制定。与 IEC 保持联络的国际的、政府的和非政府的组织也可参加国际标准的制定。IEC 与国际标准化组织（ISO）根据两组织协商确定的条件保持密切的合作关系。

2）IEC 在技术问题上的正式决议或协议，是由对这些问题特别关心的国家委员会参加的技术委员会制定的，对所涉及的问题尽可能地代表了国际上的一致意见。

3）这些决议或协议以标准、技术报告或导则的形式发布，以推荐的形式供国际上使用，并在此意义上，为各国委员会所采纳。

4）为了促进国际上的统一，各 IEC 国家委员会有责任使其国家和地区标准尽可能采用 IEC 标准。IEC 标准与相应国家和地区标准之间的任何差异应在国家和地区标准中指明。

国际标准 IEC 60825-1 已经由 IEC/TC 76（光辐射安全与激光设备）技术委员会制定。

本标准的正文是依据以下的文件：

DIS/FDIS	表决报告	DIS 的修订件	表决报告
76(CO)6	76(CO)7	76(CO)8	76(CO)11
76(CO)15	76(CO)16		
76(CO)28 和 28B	76(CO)34		
76/157/FDIS	76/165/RVD		

本标准投票表决通过的详细情况可查阅上表列出的投票表决报告。

IEC 60825-1 的第一版取代了 1984 年出版的 IEC 60825 第一版和修改单 1，也取代 1986 年出版的 IEC 60820。

IEC 60825-1 含有对于激光辐射关于人员安全的一组安全标准的情况按 IEC 60104 导则的要求执行。

在此版中 IEC 60825-1 也称为“第 1 部分”。

附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 E 和附录 F 只是提示的附录。

中华人民共和国国家标准

激光产品的安全 第1部分：设备分类、要求和用户指南

GB 7247.1—2001
idt IEC 60825-1:1993

代替 GB 7247—1995

Safety of laser products—
Part 1:Equipment classification,requirements and user's guide

第一篇 总 则

1 范围和目的

1.1 范围

GB 7247.1适用于激光产品的安全。为了方便起见，本标准分成独立的三个篇章：第一篇(总则)和附录、第二篇(制造要求)、第三篇(用户指南)。

激光产品可以是附带或不附带独立电源的单一激光器，也可以是装配了一个或多个激光器的复杂光学、电气或机械系统。激光产品一般用于物理和光学现象的演示、材料加工、数据读出及存储、信息传输及显示等等。这些系统已用在工业、商业、娱乐、研究、教育及医学上。但是，出售给其他制造厂商用作任何系统部件的激光产品可以不遵守本标准，因为最终产品本身将要服从本标准。

本标准中所用的词汇"激光器"无论何时都包括LED(发光二极管)。

符合下列条件的激光产品或LED产品，不需考虑本标准的要求，如果：

——制造厂商根据第3章、第8章、第9章的分类，表明在所有工作、维护、检修和故障条件下其发射水平不超过1类的AEL；

——不含有嵌装式激光器或嵌装式LED。

除了激光辐射引起的危害外，激光设备也可引起其他伤害，诸如着火和电击。

本标准阐述最低要求。

如果激光系统构成设备的一部分，而设备必须遵从国家或IEC安全标准[如医疗设备(IEC 60601-2-22)、信息技术设备[1)](GB 4943)、音频和视频设备(GB 8898)、在有害环境中用的设备]，则除产品安全标准外，该设备还应符合本标准对激光产品的安全要求。然而，如果激光系统从设备移开后可以单独工作，则被移开的单元应符合本标准的要求。

如果没有适用的产品安全标准，则应使用GB 4793.1。

本标准的*MPE*(最大允许照射量)值只针对激光辐射而不适用于伴随辐射。

然而，如果某种业务存在一种危险的可接触伴随辐射，则可以使用激光辐射的*MPE*值对该危险进行谨慎的评估。

*MPE*值不适用于医学上对患者进行治疗的激光照射。

注：附录A～附录D包括一般指导并列举了许多典型例子。但一定不要将附录看作是确定的或详尽的，而应作为第一篇到第三篇相应条款的参考资料。

采用说明：

1] 原文有误，原文为"办公机器"，应为"信息技术设备"。

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 2001-11-05 批准　　　　2002-05-01 实施

1.2 目的

1.2.1 为了保护人员免受波长范围为 180 nm～1 mm[1]激光辐射的伤害，提出激光辐射的安全工作水平并引入按照激光器和激光产品危害程度的分类体系。

1.2.2 为用户和制造厂商建立工作程序制订要求并为其提供信息，以便采取适当的预防措施。

1.2.3 通过标签、标记和说明确保能够警告与激光产品的可达辐射有关的各种危害。

1.2.4 为减小损伤的可能性，使不必要的可达辐射减至最小，并且通过保护措施改进激光辐射危害的控制，通过规定用户控制措施提供激光产品的安全使用。

1.2.5 保护人员免受来自操作和使用激光产品造成的其他危害。

2 引用标准

下列标准所包含的条文，通过在本标准中引用而构成为本标准的条文。本标准出版时，所示版本均为有效。所有标准都会被修订，使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB 4793.1—1995 测量、控制和实验室用电气设备的安全要求 第1部分：通用要求 (idt IEC 61010-1:1990)

GB 3100—1993 国际单位制及其应用(eqv ISO 1000:1992)

IEC 61040:1990 测量激光辐射功率能量的探测器、仪器与设备

IEC 60027-1:1992 电气技术中所用的文字符号 第1部分：一般要求

IEC 60050-845:1987 国际电工词汇(IEV)第845章：光

IEC 60601-2-22:1992 医用电气设备 第2部分：诊断和治疗用激光设备安全的特殊要求

IEC 60825-2:1993 激光产品的安全 第2部分：光纤通信系统的安全

3 定义[2]

本标准采用下列定义。

3.1 挡板 access panel

防护罩或防护围封的一部分。当移开或拆去时，可提供激光辐射的通路。

3.2 可达发射极限(*AEL*) accessible emission limit (*AEL*)

所定类别内允许的最大发射水平。

3.3 管理控制 administrative control

非工程安全措施。如：开关监视、人员的安全培训、警告措施、发射程序及现场的安全控制。

3.4 准直用激光产品 alignment laser product

为下列一个或几个用途而设计、制造、预定或推销的激光产品：

a) 通过角度测量确定并描绘出点、面、体的位置、形状或区域；

b) 彼此各部分相对定位或调整；

c) 确定平面、水准、高度或直线。

3.5 α 最小值(α_{min}) alpha min(α_{min})

见对向角(3.6)。

3.6 对向角(α) angular subtense(α)

对向角是表观光源(包括漫反射)在观察者眼睛或测量点所张的视角(见最大对向角(3.49)和最小对向角(3.53))。本概念在附录A的第A3章中讨论。

1) 在本标准中，波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 表示 $\lambda_1 \leq \lambda < \lambda_2$(即 180 nm～1 mm 表示 180 nm≤λ<1 mm)。

2) 为了方便，本标准的定义按对应的英文字母顺序排列。这些定义多数来自 IEC 60050-845，与 IEC 60050-845 有差异的定义均加以说明。参考 IEC 60050 第845章的定义。

3.7 窗口;孔径光阑 aperture;aperture stop

窗口是激光产品防护罩或其他屏蔽物上的任一开孔,通过该孔发射的激光辐射允许人员接近。

孔径光阑是用来确定待测辐射通过面积的开孔。

3.8 表观光源 apparent source

在视网膜上可能形成最小影像的实际发光体或虚发光体。

注:本定义用于确定 400 nm～1 400 nm 波长范围内的激光辐射表观发光源的位置,其中假定表观光源处于眼睛的可调节范围内(≥100 mm)。在发散度为零的极限情况,即理想的平行光束情况下,表观光源的位置为无穷远。表观光源这一概念的适用波长可扩展到 302.5 nm～4 000 nm 的波长范围,因为这一范围内的光波均可用普通透镜聚焦。

3.9 光束衰减器 beam attenuator

将激光辐射降低到或低于规定水平的装置。

3.10 光束直径(光束宽度) beam diameter (beam width)

在空间某点处的光束直径 d_u 是指其功率(或能量)为总激光功率(或能量)的 u%的最小圆直径。本标准采用 d_{63}。

注:对于高斯光束,d_{63}对应于辐照度(辐照量)降低到它的中心峰值的 1/e 的点。

3.11 光束发散角 beam divergence

光束发散角是由光束直径限定的锥形远场平面角。如果间距为 L 的两点的光束直径(见 3.10)为 d_{63}和 d'_{63},则光束的发散角为:

$$\arctan[(d_{63} - d'_{63})/L]$$

SI 单位:弧度

3.12 扩束器 beam expander

可增大激光束直径的光学器件组。

3.13 光路元件 beam path component

位于规定光路的光学元器件(例如:光束控制镜或聚焦透镜)。

3.14 光束终止器 beam stop

终止激光束路径的装置。

3.15 1 类激光产品 class 1 laser product

在相应波长和发射持续时间内,人员接近激光辐射不允许超过 1 类可达发射极限(AEL)的激光产品(见 9.2)。

3.16 2 类激光产品 class 2 laser product

满足:

a) 在 400 nm～700 nm 波长范围内,人员接近激光辐射有可能超过 1 类可达发射极限(AEL)但不超过 2 类可达发射极限(AEL)的激光产品;

b) 在任何其他波长上,人员接近激光辐射不允许超过 1 类可达发射极限(AEL)的激光产品(见 9.2)。

3.17 3A 类及 3B 类激光产品 class 3A and class 3B laser product

人员接触激光辐射有可能超过 1 类及 2 类相应可达发射极限(AEL),但在任何发射持续时间及波长上,人员接触激光辐射各自不允许超过 3A 类和 3B 类可达发射极限(AEL)的激光产品(见 9.2)。

3.18 4 类激光产品 class 4 laser product

人员接触有可能超过 3B 类可达发射极限(AEL)的激光产品(见 9.2)。

3.19 伴随辐射 collateral radiation

激光器运行时所必然产生的,或者因激光器运行而使激光产品发射的,在 180 nm～1 mm 波长范围内激光辐射以外的电磁辐射。

3.20　准直光束　collimated beam

发散角或收敛角极小的“平行”辐射光束。

3.21　连续波(CW)　continuous wave (CW)

激光输出是连续的而不是脉冲的波形。在本标准中，把连续输出时间等于或大于 0.25 s 的激光视为连续激光。

3.22　规定光路　defined beam path

在激光产品内部激光光束的预定路径。

3.23　演示类激光产品　demonstration laser product

为了演示、娱乐、广告宣传、显示或艺术构图而设计、制造、预定或推销的激光产品。“演示类激光产品”一词不适用于为其他应用而设计和预定的激光产品，虽然它们也可能用于演示这些应用。

3.24　漫反射　diffuse reflection

辐射光束通过一表面或介质多向散射而改变了辐射光束空间分布。理想漫反射可破坏出射方向与入射方向的所有关系。

注：这个定义与 IEC 60050-845[1]不同。

3.25　嵌装式激光产品　embedded laser product

在本标准中，嵌装式激光产品是由于工程设计限制了可达发射极限，因而所定类别低于其中激光器固有发射能力的激光产品。

3.26　发射持续时间　emission duration

由于使用、维护或检修激光产品，可能出现人员接触激光辐射的单脉冲、脉冲串或系列脉冲的持续时间，或连续波激光的使用时间。

3.27　漂移激光辐射　errant laser radiation

与规定光路有偏离的激光辐射。这样的辐射包括来自光路元件的多余二次反射，未调准或已损坏元件的异常辐射及来自工件的反射。

3.28　照射时间　exposure time

单脉冲、系列脉冲、脉冲串或连续激光辐射照射到人体上的持续时间。

3.29　扩展源观察　extended source viewing

在 100 mm 或更远处的表观光源对眼睛所成的张角大于最小对向角(α_{min})的观察情况。

例如对某些漫反射和某些激光二极管阵列的观察。

3.30　失效保护　fail safe

当元件失效时不增加危害的保护设计。在系统失效时，使系统不工作或无危害。

3.31　失效保护安全联锁　fail safe safety interlock

系统失效时，联锁作用不失效的安全装置。例如：一旦铰接盖开始打开或可拆卸盖被拆除之前，联锁必定处于并保持在“关闭”位置，直到铰接盖关上或可卸盖进入锁定状态，联锁才处于“开启”位置。

3.32　人员接触　human access

a) 人体受到由窗口发出的有害激光辐射的可能性；或者一个直径为 12 mm，最长为 80 mm 的探头阻断 2 类、3A 类，或阻断在 400 nm～700 nm 波长范围内其 *AEL* 不大于 2 类激光辐射 5 倍的 3B 类激光辐射的可能性，或

b) 在防护罩内，有超过 a)中激光辐射限值的激光辐射水平时，人体的任一部分受到由产品内任意伸进单个平面直接反射并通过防护罩的任何开孔射出的有害激光辐射的可能性。

3.33　总辐亮度　integrated radiance

采用说明：

1] 原文为 IEV 845-04-47。

辐亮度在给定照射时间内的积分，表示为单位发射立体角内，单位辐射面积上的辐射能量(通常用单位 $J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$表示)。

3.34 光束内视 intrabeam viewing

眼睛暴露在激光辐射中看激光束，不包括扩展源观察的情况。

例如对准直光束和点光源的观察。

3.35 辐照度 irradiance

投射到表面一点处的面元上的辐射通量 dΦ 与该面元的面积 dA 之商。

符号：E

$$E=\frac{d\Phi}{dA}$$

SI 单位：瓦特每平方米($W \cdot m^{-2}$)

3.36 激光器 laser

主要通过受控受激发射过程而产生或放大波长在 180 nm～1 mm 范围的电磁辐射装置。

注：这个定义与 IEC 60050-845[1]不同。

3.37 激光受控区 laser controlled area

对滞留和活动进行控制和监视以免受辐射危害的区域。

3.38 激光能源 laser energy source

为激励电子、离子或分子等提供能量而与激光器联在一起的装置。不能认为一般能源(如供电电源或电池)是激光能源。

3.39 激光危害区 laser hazard area

见标称眼危害区(3.55)。

3.40 激光光纤传输系统 laser fibre optic transmission system

由一个或一个以上激光发送器及相应的纤维光缆组成的系统。

3.41 激光产品 laser product

用于构成或准备用于构成一个激光器或一个激光系统的任何产品或部件的组合。作为一个部件(或代用件)而出售给其他制造者的电子产品元件不属于激光产品。

3.42 激光辐射 laser radiation

由激光产品的受控受激发射而产生的波长为 180 nm～1 mm 的所有电磁辐射。

3.43 激光安全员 laser safety officer

熟知激光危害评估与控制，并负责监督激光危害控制的人员。

3.44 激光系统 laser system

是激光器与相应的带或不带附加元件的激光能源的组合。

3.45 水准测量用激光产品 levelling laser product

准直用激光产品(见 3.4)。

3.46 发光二极管(LED) light emitting diode (LED)

在半导体内通过辐射再激活产生波长 180 nm～1 mm 范围内的电磁辐射的半导体 p-n 结器件。(光辐射主要由自发发射过程产生，尽管也存在一定的受激发射。)

3.47 限制孔径 limiting aperture

对辐射度和辐照量进行平均的圆域。

3.48 维护 maintenance

激光产品制造厂商在用户使用说明书中规定的调整方式或程序。为了保证激光产品的正常工作，用户要执行这些程序。维护不包括使用或检修。

采用说明：

1] 原文为 IEV 845-04-39。

3.49 最大对向角(α_{max}) maximum angular subtense (α_{max})

表观光源对向角的值，当对向角高于该值时，其 MPE 和 AEL 不依赖光源的尺寸。

3.50 最大输出 maximum output

出厂后的激光产品在整个工作范围内，任意时间向任何方向发射的总的可达激光辐射中的最大辐射功率或最大单脉冲辐射能量。

3.51 最大允许照射量(*MPE*) maximum permissible exposure (*MPE*)

正常情况下人体受到激光照射不会产生不良后果的激光辐射水平。*MPE* 水平指眼或皮肤受到照射后即刻或长时间后无损伤发生的最大照射水平，它与辐射波长、脉宽或照射时间、处于危险状态的生物组织以及暴露在 400 nm～1 400 nm 的可见和近红外辐射中的视网膜成像的大小等有关。在第 13 章中具体规定了最大允许照射水平(就现有的知识状况)。附录 A 给出了计算 *MPE* 水平的实例。

3.52 医用激光产品 medical laser product

为了通过激光照射对人体的任何部位进行诊断、手术或治疗而设计、制造、预定或推销的任何激光产品。

3.53 最小对向角(α_{min}) minimum angular subtense (α_{min})

表观光源对向角的值，对向角大于该值的光源被认为是扩展源，光源的对向角小于 α_{min} 时，其 *MPE* 和 *AEL* 不依赖于光源尺寸。

3.54 锁模 mode-locking

激光谐振腔内产生一规则的、脉宽非常窄的脉冲串的机理或现象。在特定条件下，还可自发产生"模式自锁定"，产生的峰值功率可远大于其平均功率。

3.55 标称眼危害区(NOHA) nominal ocular hazard area (NOHA)

光束辐照度或辐照量超过相应角膜的最大允许照射量(MPE)的区域，其中包括可能出现的激光束意外指错方向的情况。如果 NOHA 包括通过光学辅助器观看激光束的可能性，则定义为"扩展 NOHA"。

3.56 标称眼危害距离(NOHD) nominal ocular hazard distance (NOHD)

光束辐照度或辐照量等于相应角膜的最大允许照射量(MPE)的距离。如果 NOHD 包括通过光学辅助器观看激光束的可能性，则定义为"扩展 NOHD"。

3.57 操作 operation

激光产品执行其所有预定功能。它不包括维护或检修。

3.58 防护围封 protective enclosure

防止人员受到激光辐射照射的一种物理装置，除非安装预定功能时方能进入。

3.59 防护罩 protective housing

为防止人员接触超过规定可达发射极限的激光辐射而设计安装在激光产品(包括安装嵌装式激光器的产品)上的那些防护部分(一般由制造厂商安装)。

3.60 脉宽 pulse duration

在脉冲前、后沿的半峰值功率点间测得的时间差。

3.61 脉冲激光器 pulsed laser

以单脉冲或脉冲串形式释放能量的激光器。在本标准中，一个脉冲的宽度要小于 0.25 s。

3.62 辐(射)亮度 radiance

由下式定义的量：

$$L = \frac{d\Phi}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega}$$

式中：$d\Phi$——由光束元通过某一点在给定方向上的立体角 $d\Omega$ 中传输的辐射通量；

dA——给定点的光束横截面面积；

θ——切面法线和光束方向的夹角。

符号：L

SI单位：$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$

注：该定义是IEC 60050-845[1]的简化形式，足够本标准使用。如难以确定，则应遵从IEC的定义。

3.63 辐射能量 radiant energy

辐射通量在给定持续时间Δt内对时间的积分(IEC 60050-845)[2]。

符号：Q $$Q=\int_{\Delta t}\Phi \mathrm{d}t$$

SI单位：焦耳(J)

3.64 辐照量 radiant exposure

照射到表面某处面元上的辐射能量除以该面元的面积(通常用$J \cdot m^{-2}$表示)。

符号：H $$H=\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}A}=\int E\mathrm{d}t$$

SI单位：焦耳每平方米($J \cdot m^{-2}$)

3.65 辐射通量；辐射功率 radiant flux; radiant power

以辐射形式发射、传播或接收的功率(IEC 60050-845)[3]。

符号：Φ,P $$\Phi=\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}$$

SI单位：瓦(W)

3.66 反射比 reflectance

在一定条件下反射的辐射功率与入射的辐射功率之比(IEC 60050-845)[4]。

符号：ρ

SI单位：1

3.67 遥控联锁连接器 remote interlock connector

使外部控制器与隔开的激光产品的其他部件相连的连接器(见4.4)。

3.68 安全联锁装置 safety interlock

当防护罩某部分移开时，为防止人员接触3类或4类激光辐射而设置的与防护罩相连的自动装置。

3.69 扫描激光辐射 scanning laser radiation

相对于固定参照系，随时间的变化而改变辐射方向、源点或传播模式的激光辐射。

3.70 检修 service

执行制造厂商检修说明书中所描述的那些程序或调整，它可影响产品的性能。但检修不包括维护或使用。

3.71 检修接头 service connection

在激光光纤传输系统中为检修而设计的可接触连接点，需用工具才能将其断开。

3.72 检修板 service panel

为检修设计的可移开或可拆卸的挡板。

3.73 单一故障条件 single fault condition

在产品中可能发生的单一故障和该故障直接引发的结果。

采用说明：

1] 原文为IEV 845-01-34。

2] 原文为IEV 845-01-27。

3] 原文为IEV 845-01-24。

4] 原文为IEV 845-04-58。

3.74 镜面反射 specular reflection

入射辐射光束与反射辐射光束之间保持镜反射角对应关系的一种面反射，如：平面镜反射。

3.75 测绘用激光产品 surveying laser product

见准直用激光产品(见 3.4)。

3.76 工具 tool

指可用于操作螺钉或进行类似安装操作的螺丝刀、硬币或其他物品。

3.77 透射比 transmittance

在一定条件下透射的辐射通量与入射的辐射通量之比(IEV 60050-845)[1]。

符号：τ

SI 单位：1

3.78 透射(光)密度 transmittance (optical) density

透射比 τ 的倒数取 10 为底的对数(IEC 60050-845)[2]。

符号：D $D=-\log_{10}\tau$

3.79 可见辐射(光) visible radiation (light)

能直接引起视觉的光学辐射(IEC 60050-845)[3]。

注：本标准中，取波长为 400 nm～700 nm 间的电磁辐射为可见辐射。

3.80 工件 workpiece

用激光辐射进行加工处理的物品。

第二篇 制造要求

4 工程技术要求

4.1 一般要求

根据制造厂商确定的安全类别，在激光产品内部需采取一定的安全措施。4.2～4.10 给出了这些要求。制造厂商要确保那些负责激光产品和激光系统分类的人接受相应水平的培训，从而使他们充分理解分类方案的内容。

4.1.1 变更

如果由于变更原已分类的激光产品而影响本标准范围内激光产品某方面性能或预定功能，则进行这种变更的人员或机构要负责确保对激光产品重新分类、贴标记。

4.2 防护罩

4.2.1 一般要求

每个激光产品必须装有防护罩以防止人员接触超过 1 类的激光辐射(包括漂移激光辐射)除非因执行产品的功能需要时才可接触激光辐射。(见附录 E 对高功率激光器要求的指南。)

4.2.2 检修

检修时，移开或拆除激光产品(包括嵌装式激光产品)防护罩或防护围封的任意部分，这会使人员接触到超过指定 *AEL* 的激光辐射而又未被联锁(见 4.3)，则该部分必须紧固，需要使用工具才能移开或拆除。

4.2.3 可分离激光系统

采用说明：

1] 原文为 IEV 845-04-59。

2] 原文为 IEV 845-04-66。

3] 原文为 IEV 845-01-03。

如果嵌装式激光产品或激光系统可移出防护罩或防护围封并且不加变动仍能工作，则该激光器必须符合第4章和第5章与其安全类别相适应的制造要求。作为系统的部件而出售给其他制造厂商的激光产品可以不遵守本标准，因为其最终激光产品会符合本标准。

4.3 挡板和安全联锁

4.3.1 当下列情况均满足时，则必须为防护罩的挡板提供安全联锁：

a）在维护或工作期间预定要移开或拆除的挡板；

b）移开挡板可使人员接触到超过3A类 *AEL* 的激光辐射；但如果3B类或4类产品的辐射波长在400 nm～700 nm范围内，内部可接触激光辐射为3B类且不超过2类 *AEL* 的5倍，则不需要安全联锁。

下表中标有(×)的需要有安全联锁。

产品类别	移开挡板时的可接触发射				
	1	2	3A	3B	4
1	—	—	—	×	×
2	—		—	×	×
3A	—	—	—	×	×
3B	—	—	—	×*	×
4		—	—	×*	×

* 如果波长在400 nm～700 nm范围内，内部可接触激光辐射为3B类，而且不超过2类 *AEL* 的5倍，则不要求安全联锁。

挡板移开不得使开孔处有超过3A类 *AEL* 的发射。

安全联锁的设计必须能防止挡板移开，除非可接触的发射水平低于给定类别的 *AEL* 值而且在任何情况下都低于4.3.1中b)规定的极限值。联锁意外复位时，它本身既不会使发射值恢复到指定类别的 *AEL* 以上，也不会使之高于4.3.1中b)规定的极限值。

4.3.2 制造厂商如果为用户提供预定的取消功能装置，则必须同时提供有关安全工作方法的详细说明书。挡板恢复原位时取消功能应不起作用。这种联锁器必须贴上符合5.9.2的明显标记。只要激光器受到激发或电容器组放电不充分，无论挡板是否被移开或拆除，采用取消功能时都必须发出明显的可视或可闻警告。可视警告透过专门设计的或针对可接触辐射波长的防护眼镜后必须清晰可见。

4.4 遥控联锁连接器

除400 nm～700 nm波长范围内发射不超过2类 *AEL* 值5倍的3B类激光产品外，属于4类和3B类的任何激光系统必须装有遥控联锁连接器。当连接器的终端开路时，可达辐射不得超过1类、2类或3A类的 *AEL*。

4.5 钥匙控制器

除400 nm～700 nm波长范围内发射不超过2类 *AEL* 值5倍的3B类激光产品外，属于4类和3B类的任何激光系统必须安装一个用钥匙操作的总开关。钥匙必须是可取下的，而且当取下钥匙时激光辐射是不可接触的。在本标准中，“钥匙”一词包括任何其他控制装置，如磁卡、密码系统等。

4.6 激光辐射发射警告

4.6.1 除400 nm～700 nm波长范围内发射不超过2类 *AEL* 值5倍的3B类激光器外，属于4类和3B类的每个激光系统在接通电源时，或脉冲激光器的电容器组正在充电时或确实尚未放电时，应给出一个可闻的或可视的报警。报警装置应有失效保护或冗余设计。任意一种可视报警装置，在通过为某波长（或波段）激光辐射专门设计的防护眼镜后，必须清晰可见。可视报警装置的安装位置必须使观察者观察时不会受到超过1类和2类 *AEL* 值激光辐射的照射。

4.6.2 每个与辐射警告装置相隔2 m或更远的操作控制器和激光窗口本身应配备辐射警告装置。对

于在操作控制器或激光窗口附近的人员，警告装置必须清楚可见或可闻。

4.6.3 根据4.6.1，如果激光发射有可能被分散到不只1个输出孔，则可见警告装置应清楚地指出可能出现激光发射的输出孔。

4.7 光束终止器或衰减器

除400 nm～700 nm波长范围内发射不超过2类*AEL*值5倍的3B类激光产品外，属于4类和3B类的任何激光系统必须带有一个或多个永久性的附加衰减装置（光束终止器或衰减器，而不是激光能源开关，电源连接器或钥匙控制器）。光束终止器或衰减器应能防止人员接触超过1类、2类或3A类*AEL*值的激光辐射。

4.8 控制装置

每一激光产品必须装有控制装置，确保在调整和使用时，不会受到超过1类及2类*AEL*的激光辐射照射。

4.9 光学观察器

激光产品上的任何光学观察器、观察孔或显示屏必须提供充分的衰减以防人员接触超过1类*AEL*的激光辐射，对于这些光学观察器、观察孔或显示屏上的任一光闸或可变衰减器，必须提供某种手段使得：

a）当光闸打开或衰减量变化时，防止人员接触到超过1类*AEL*的激光辐射；

b）当有可能受到超过1类*AEL*的激光辐射照射时，防止打开光闸或改变衰减器的衰减量。

4.10 扫描安全装置

预定发射扫描辐射的激光产品，按其分类，在扫描失效或扫描速率与幅度发生变化时，不应使人员接触到超过所定类别*AEL*激光辐射的安全装置。

4.11 准直辅助器

在日常维护要求对光路元件准直时，需要提供的相应的安全装置。

4.12 “进入”通道

如果防护罩安装了能够提供“进入”通道的挡板，则：

a）必须采取措施使任何进入防护罩内的人员都能避免意外接触激光危害，1类、2类、3A类或400 nm～700 nm波长范围内，不超过2类*AEL*5倍的3B类激光辐射危害除外；

b）安装警告的装置，必须充分警告可能处于防护罩中的人员当心超过3A类*AEL*的激光辐射发射和400 nm～700 nm波长范围内不超过2类*AEL*5倍的3B类激光器的发射。

4.13 环境条件

在适合于产品的预定用途的所有预计工作条件情况下，激光产品应满足本标准规定的安全要求。应考虑的因素包括：

——气候条件（例如：温度、相对湿度）；

——振动和冲击。

如果在产品的安全标准中无规定，则使用GB 4793.1的相应条款。

注：有关电磁敏感度的要求正在考虑中。

4.14 其他危害防护

4.14.1 非光学危害

在工作过程中和下述单一故障条件下，应满足相应产品安全标准的要求：

——电气伤害；

——温度过高；

——设备中火焰的蔓延；

——声音和超声波；

——有害物质；

——爆炸。

如果在产品的安全标准中无规定，则使用GB 4793.1的相应条款。

4.14.2 伴随辐射

激光产品的防护罩正常情况下应能防护伴随辐射(例如：紫外、可见、红外)的危害。

然而，如果存在这种情况，即如果可接触的伴随辐射是危险的，则可用激光的*MPE*值对这一危险进行保守的评价。

5 标记

5.1 一般要求

每台激光产品根据下列各条要求带有标记。在激光产品的使用、维护或检修期间，标记按其目的必须永久固定，字迹清楚，明显可见。标记应放置在人员不必受到超过1类*AEL*的激光辐射照射就能看到的位置。标记的边框及符号应在黄底面上涂成黑色，但1类激光器不必用此颜色组合。

如果激光产品的尺寸或设计不可能使产品上有标记，则建议标记附在使用说明书中或包装箱上。

5.2 1类

每台1类激光产品应具有说明标记(图15)，注明：

1类激光产品

或者在用户资料中给出同样的叙述，由制造厂商自行处理。

5.3 2类

每台2类激光产品应具有警告标记(图14)及说明标记(图15)，注明：

激光辐射

勿直视光束

2类激光产品

5.4 3A类

每台3A类激光产品应具有警告标记(图14)及说明标记(图15)，注明：

激光辐射

勿直视或通过光学仪器直接观看光束

3A类激光产品

5.5 3B类

每台3B类激光产品应具有警告标记(图14)及说明标记(图15)，注明：

激光辐射

避免光束照射

3B类激光产品

5.6 4类

每台4类激光产品应具有警告标记(图14)及说明标记(图15)，注明：

激光辐射

避免眼或皮肤受到直射或散射辐射的照射

4类激光产品

5.7 窗口标记

每台3B类及4类激光产品应在发射超过1类或2类*AEL*激光辐射的每一窗口附近带有标记。标记必须注明：

激光窗口

或

避免受到从本窗口射出的激光辐射的照射

5.8 辐射输出和标准说明

每台激光产品(除1类激光产品外)应在说明标记上注明激光辐射最大输出、脉宽(如果适用)及发射波长。应在说明标记上或者在产品上与该标记临近的其他位置上注明划分激光产品类别所依据的标准名称及其出版日期。

5.9 挡板标记

5.9.1 挡板的标记

每个接头、防护罩上的每块挡板及防护围封的每块通道挡板一旦被移开或拆除,就会使人员接触到超过1类 *AEL* 的激光辐射,则这些部分应具有标记,注明:

注意

打开时有激光辐射

此外,挡板标记应注明以下文字:

a) 如果可接触辐射不超过2类 *AEL*:

勿直视光束

b) 如果可接触辐射不超过3A类 *AEL*:

勿直视或通过光学仪器直视光束

c) 如果可接触辐射不超过3B类 *AEL*:

避免光束照射

d) 如果可接触辐射超过任一波长的3B类 *AEL*:

避免眼或皮肤受到直射或散射辐射的照射

5.9.2 安全联锁板标记

易于取消功能并在取消功能后可能使人员接触超过1类 *AEL* 激光辐射的每一安全联锁板应有明显的相应标记。这些标记必须在联锁取消功能前及取消功能期间可以看到,并且要紧靠移开防护罩形成的开口处,应注明:

注意

打开时及联锁失效时有激光辐射

此外,该标记应注明5.9.1中a)、b)、c)、d)规定的文字。

5.10 不可见激光辐射警告

许多情况下,说明标记中的用语包括短语“激光辐射”。如果输出的激光波长在400 nm～700 nm范围以外,该短语应改为“不可见激光辐射”;如果输出波长一部分在此波长范围以内,另一部分在此范围以外,则应改为“可见及不可见激光辐射”。

5.11 可见激光辐射警告

如果激光输出处在400 nm～700 nm(可见)波长范围内,则说明标记中的“激光辐射”可以改为“可见激光”。

5.12 LED辐射警告

对LED辐射,在第5章的标记中用到词汇“激光”一词的地方用“LED”代替。

6 其他说明性要求

6.1 用户资料

激光产品制造厂商在提供激光产品时,应提供(或负责提供)一整套正规的使用说明书或操作指南,即:

a) 正确装配、维护及安全使用的详细说明,包括为了避免可能的有害激光辐射的照射采用明显的警告。

b) 用合适的单位给出准直光束发散角、脉宽、最大输出及其累积测量不确定度和出厂后随时附加在制造时测量值上的预计增值(不必规定由于自锁模引起的脉冲持续时间,但应指明激光产品产生自锁

模的条件)。

另外,对于嵌装式激光产品和其他组合激光产品应为其提供类似的说明。这些说明也应包括相应的安全指南以避免使用者意外受到有害激光辐射的照射。

c) 提供欲贴在激光产品上或准备连同激光产品一道提供的所有要求标记及危害警告的字迹清楚的复制件(颜色任意)。应指明激光产品每张标记的粘贴位置;如果这些标记不能贴在激光产品上,则应予以说明且随激光产品一道提供给用户,并说明供给这些标记的形式和方法。

d) 在操作手册中清楚指出所有激光窗口的设置位置。

e) 控制、调整及使用和维护程序一览表,包括警告"注意:若不按此规定使用控制或调整装置、或执行各步操作,就可能引起有害的辐射照射"。

f) 对于那些不带能源(发射激光所必需的)的激光产品,为了确保安全必须说明对激光能源的兼容性要求。

6.2 采购及检修说明

激光产品制造厂商应提供下列说明:

a) 每个产品的安全分类应在总目录、规范活页和明细手册中说明。

b) 对检修人员、销售商及其他需要者,应提供详细说明书,说明如何检修每个型号激光产品的调整装置及其工作过程,包括明显的警告、为避免受到可能的辐射照射和其他危害所应采取的防护措施、及为了保持产品的一致性而必须的维护计划;并且在所有检修说明书中列出可能是由制造者或其代理人以外的人使用的提高可达发射水平的控制和操作过程一览表;清楚地描述允许接触超过表1、表2、表3和表4中可达发射极限的防护罩可拆部分的位置。说明书中应包括检修人员的防护措施、要求标记和危害警告的复制件字迹清楚(颜色任意)。

7 专用激光产品的附加要求

7.1 医用激光产品

每台医用激光产品应满足相应类别激光产品的所有要求。另外:

a) 任何3B类及4类医用激光产品应符合IEC 60601-1-22的要求。

b) 制造厂商应在每台医用激光产品的说明书中说明测量系统校准的程序和检定周期。

7.2 激光光纤传输系统

使用光纤传输的激光系统应具有光缆检修接头。如果接头断开时,激光辐射超过1类、2类和3A类*AEL*,且这种光缆接头构成防护罩的一部分,则必须用工具才能断开该接头。

如果预计要在无监视工作区内进行检修,则还必须考虑在接头处安装机械式光束衰减器。4类和3B类激光产品应尽可能带有一种适于探测光纤连接是否中断的装置。这种装置应能立即中止激光发射并同时驱动报警器产生一个可闻或可视的警报。

至于光纤通信系统的安全,IEC 60825-2适用。

8 检测

8.1 一般要求

检测必须考虑测量过程中的所有误差、统计不确定度(见IEC 61040)、发射的增加和辐射安全随时间推移的降低。

对于特殊使用要求可进行附加测试。

用工作状态下的检测来确定产品的类别。同样应用工作、维护和检修期间的检测恰当确定对安全联锁、标记和用户说明的要求。这样的检测应分别在可合理预见的每一个单一故障条件下进行。

可采用等效的检测方法或程序。

8.2 确定激光辐射类别的测量

根据9.1对激光产品分类时，需要对激光发射水平进行测量。当激光源的物理特性及局限性使得激光产品或激光设备明确归于某一类时，则无需进行测量。

测量必须在下列条件下进行：

a）在可达发射水平达到最大的情况下和过程中，包括激光产品的启动、稳定发射及关闭。

b）利用操作、维护及检修说明书中所列的所有控制和调节措施进行综合调节以获得辐射的最大可达发射水平。

c）在测量可达发射水平的操作过程中，人员可能接触的空间各点（例如，如果操作时要求移开防护罩的某些部分，且安全联锁失效的话，则必须在产品外壳内可能接触的那些部位进行测量）。

在302.5 nm～4 000 nm的波长范围内，测量窗口与表观光源的最小距离不小于100 mm，8.2中的f）和h）情况例外。

d）测量仪器的探测器相对激光产品的位置和方向，应使测量仪器测量到最大的辐射探测值。

e）对激光产品而非激光系统来说，激光器必须与这样的激光能源相连，该激光能源由激光产品制造厂商指定、与激光器匹配，且可使产品产生的可达辐射达到最大。

f）表观光源对向角α（在距离不小于100 mm上测定）小于或等于1.5 mrad，在400 nm～1 400 nm波长范围内，通过一个直径为50 mm圆形光阑测量可探测到的辐射功率（W）或辐射能量（J）（模拟光学仪器接收稳定激光束的情况）。

注：表观光源所对的角α由人员接触的最近点确定，但是不能小于100 mm的自由空气距离。任何大于α_{max}的角都限制到α_{max}，任何小于1.5 mrad的角都限制到1.5 mrad。

对波长在302.5 nm～4 000 nm范围内的其他光源，这个窗口的直径适用于光源的任何对向角。

在工程设计使得人员接触的最近点到表观光源（例如：凹光源）距离大于14 mm的情况下，从表观光源到50 mm光阑的距离应是从表观光源到人员接触最近点的距离的7.14倍（模拟在人员接触的最近点放置一个7 mm的光阑）。然而，从人员接触表观光源的最近点到50 mm光阑的距离应不大于2 m。

为了避免收集杂散的辐射，对准直后发散度小于5 mrad的光束，该50 mm的光阑应放置在距光束出口2 m处。

g）辐照度（$W \cdot m^{-2}$）或辐照量（$J \cdot m^{-2}$）表示其照射值根据表7列举的与眼睛相适应的限制孔径，用圆形光阑处加以平均。

h）对向角α大于1.5 mrad（在距离小于100 mm处测定；见上述f）的注）且在400 nm～1 400 nm波长范围内，当通过一个直径为7 mm圆形测量孔径测量可探测到的辐射功率（W）或辐射能量（J）时，该测量孔径的位置与光源的距离r取决于对向角α（在最小α=1.5 mrad和最大α=100 mrad之间）。

表观光源到7 mm测量孔径的距离r由下式确定：

$$r = 100\sqrt{\frac{\alpha + 0.46\ \mathrm{mrad}}{\alpha_{max}}}\quad \mathrm{mm}$$

如果工程设计不允许测量光阑放在距离为r的位置（例如：凹光源），则最小的测量距离应该在从光源到人员接触的最近点。

作为选择，如果允许在距表观光源r以内放置一直径为7 mm的圆形孔径光阑，则可用一个直径d在7 mm～50 mm之间的圆形孔径光阑进行测量，d取决于光源的对向角α（在最小α_{min}=1.5 mrad和最大α_{max}=100 mrad之间），该圆形孔径光阑应放置在距表观光源100 mm处。

测量孔径的直径由下式确定：

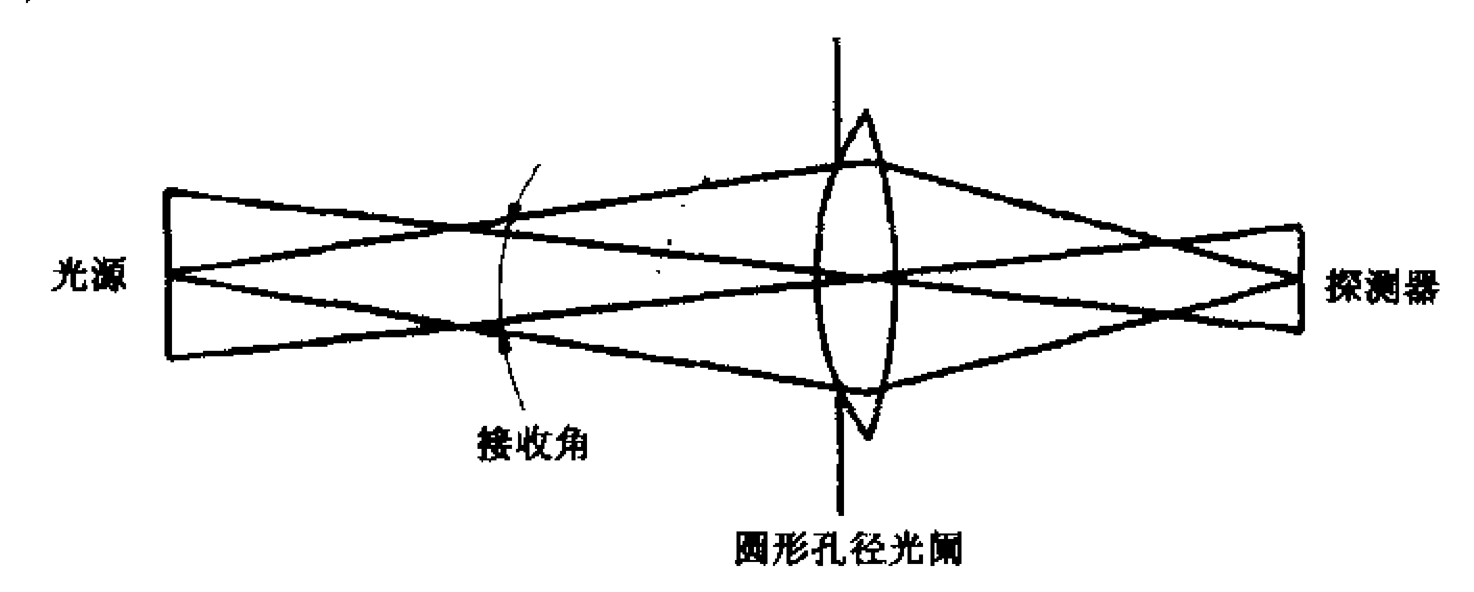
$$d = 7\sqrt{\frac{\alpha_{max}}{\alpha + 0.46\ \mathrm{mrad}}}\quad \mathrm{mm}$$

对于对向角大于α_{min}且波长在400 nm～1 400 nm范围内由多点组成的表观光源或线光源的激光

辐射，必须对每一个单点或点的组合进行测量或评价，以保证其不超过每一局部区域的每一个可能的对向角 $\alpha(\alpha_{min} \leqslant \alpha \leqslant \alpha_{max})$对应的 *AEL*，对整个光源（所用接收角不大于 α_{max}）也要进行类似的测量或评价。

确定 *AEL* 值时，矩形光源或线光源对向角的值应由光源的两个角的算术平均值确定。任何一个大于 α_{max}或小于 1.5 mrad 的角都应在确定算术平均值之前各自限制到 α_{max}或 1.5 mrad。

测量示意图如下：



i) 测量直径为 7 mm 的固定的圆形孔径光阑内的杂散激光辐射（应将由此产生的被测辐射的短暂变化看作单脉冲或系列脉冲）。

j) 在 302.5 nm～4 000 nm 波长范围内接收角为 α_{max}(0.1 rad)。然而，为了测量一列中单个元素（见上述 h））的激光辐射，接收角可小于 α_{max}。

k) 必须采取适当措施以避免或消除伴随辐射对测量的影响。

9 分类

9.1 引言

由于激光束的波长、能量及脉冲特性可能涉及的范围很广，所以使用时危害程度很悬殊。不可能按共同的安全限值把激光产品定为一组。

9.2 激光器分类的规定

1 类：在合理可预见的工作条件下是安全的激光器。

2 类：发射波长为 400 nm～700 nm 可见光的激光器，通常可由包括眨眼反射在内的回避反应提供眼睛保护。

3A 类：用裸眼观察是安全的激光器。对发射波长为 400 nm～700 nm 的激光，由包括眨眼反射在内的回避反应提供保护。对于其他波长对裸眼的危害不大于 1 类激光器。用光学装置（如：双目镜、望远镜、显微镜）直接进行 3A 类的光束内视观察可能是危险的。

3B 类：直接光束内视是危险的激光器。观察漫反射一般是安全的（见 12.5.2 c）的注）。

4 类：能产生危险的漫反射的激光器。它们可能引起皮肤灼伤、也可引起火灾。使用这类激光器要特别小心。

9.3 分类方法

制造厂商或其代理商有责任对激光产品进行正确的分类。激光产品要在综合考虑其出厂后任何时间工作时可接触的全部辐射波长和输出功率的基础上进行分类，并将其划分到相应的最高类上。1 类、2 类、3A 类及 3B 类（按照危害增大的顺序排列）*AEI* 分别在表 1～表 4 中给出。

在表 1～表 4 的注中给出了修正因子的值，它们是波长、发射持续时间、脉冲数量和对向角的函数。

确定激光产品为某一特定类别的规则如下：

a) 单波长辐射

定为某一类别的单波长激光产品，其通过窗口的激光辐射超过所有较低类 *AEL* 但不超过本类 *AEL*。

b) 多波长辐射

——发射的两个或两个以上波长落在表 5 所示的有叠加效应光谱范围内的激光产品的类别为：其

通过窗口的激光辐射与相应波长的较低类 AEL 之比的总和大于 1，但对所规类别而言其总和不超过 1。

——发射的两个或两个以上波长没有表 5 所示叠加效应的激光产品的划分类别为：通过窗口的激光辐射中至少有一个波长超过所有较低类别 AEL 值，但所有波长的激光辐射均不超过本类别 AEL。

c）考虑到人员接触的分类：防护罩

如果由于故障模式或将人体的某部分进入可能导致人体某一部分通过防护罩的任何孔隙受到激光辐射的照射，则必须根据此处存在的辐射及人体可能受到照射的部位对该激光产品进行分类、标记或其他处理。

d）扩展源的辐射

表观光源的对应平面角 α 大于 α_{min}（不同于多数激光源）时的光源称为扩展光源。

$\alpha_{min}=1.5$ mrad　　$t<0.7$ s

$\alpha_{min}=2t^{3/4}$ mrad　　$0.7\ s\leqslant t<10$ s

$\alpha_{min}=11$ mrad　　$t\geqslant 10$ s

对于扩展光源而言，测得的功率或能量必须低于所定类别的 AEL 允许的相应功率和能量，在此 AEL 是角 α 的函数。必须在距表观光源的最小距离上计算或测量 α，但最小距离不小于 100 mm。

当光源对应的角小于或等于 α_{min}时，AEL 和 MPE 与光源的对向角无关。

e）时间基准

本标准采用下列时间基准：

——在 400 nm～700 nm 波长范围内，由表 2 和表 3 分别确定的 2 类和 3A 类激光辐射的时间基准为 0.25 s；

——除 a）和 c）中列举的情况外，对于波长大于 400 nm 的激光辐射，时间基准为 100 s；

——对于波长小于或等于 400 nm 的激光辐射和波长大于 400 nm 且激光产品设计或功能本身要求有意识长期观察的激光辐射，时间基准为 30 000 s。

9.4 重复脉冲激光器或调制激光器

由于现有的重复脉冲照射判据的资料很有限，在评价重复脉冲辐射照射时必须慎重。为了确定适用于重复照射的 AEL 必须采用下列方法。

波长为 400 nm～10^6 nm 的 AEL 按下述 a）、b）、c）中最严格的要求确定，其他波长的 AEL 按 a）和 b）中最严格的要求确定。

a）脉冲串中任一脉冲的照射量不超过单脉冲 AEL。

b）持续时间为 T 的一脉冲串的平均功率不得超过表 1、表 2、表 3 及表 4 中脉冲宽度为 T 的单脉冲 AEL 所对应的功率。

c）脉冲串中任一单脉冲的照射量不得超过单脉冲的 AEL 值与修正因子 C_5[1] 的乘积：

$$AEL_{串} = AEL_{单} \times C_5$$

式中：$AEL_{串}$——脉冲串中任一单脉冲的 AEL 值；

$AEL_{单}$——单脉冲的 AEL 值；

C_5——$N^{-1/4}$；

N——相应时间基准内脉冲串的脉冲数。

在有些情况下，这个值可降到在相同峰值功率用相同时间基准连续工作的 AEL 之下。在这些情况下，可用连续工作时的 AEL 值。

1）C_5 只适用于脉宽小于 0.25 s 的情况。

表 1　1 类激光产品的可达发射极限

<table>
<tr><th>发射持续时间 t/s
波长 λ/nm</th><th>$<10^{-9}$</th><th>10^{-9} ~ 10^{-7}</th><th>10^{-7} ~ 1.8×10^{-5}</th><th>1.8×10^{-5} ~ 5×10^{-5}</th><th>5×10^{-5} ~ 1×10^{-3}</th><th>1×10^{-3} ~ 3</th><th>3~10</th><th>10~10^{3}</th><th>10^{3}~10^{4}</th><th>10^{4}~3×10^{4}</th></tr>
<tr><td>180~302.5</td><td rowspan="3">2.4×10^{4} W</td><td colspan="9">2.4×10^{-5} J</td></tr>
<tr><td>302.5~315</td><td colspan="6">$7.9\times10^{-7}C_1$ J($t<T_1$)
$7.9\times10^{-7}C_2$ J($t>T_1$)</td><td colspan="3">$7.9\times10^{-7}C_2$ J</td></tr>
<tr><td>315~400</td><td colspan="6">$7.9\times10^{-7}C_1$ J</td><td>7.9×10^{-3} J</td><td colspan="2">7.9×10^{-6} W</td></tr>
<tr><td>400~550</td><td rowspan="2">$200\,C_6$ W</td><td rowspan="2" colspan="2">$2\times10^{-7}C_6$ J</td><td rowspan="2" colspan="4">$7\times10^{-4}t^{0.75}C_6$ J</td><td colspan="2">$3.9\times10^{-3}C_6$ J</td><td>$3.9\times10^{-7}C_6$ W</td></tr>
<tr><td>550~700</td><td colspan="2">($t<T_2$)
$7\times10^{-4}t^{0.75}C_6$ J
$3.9\times10^{-3}C_3C_6$ J
($t>T_2$)</td><td>3.9×10^{-7}
C_3C_6 W</td></tr>
<tr><td>700~1 050</td><td>$200\,C_4C_6$ W</td><td colspan="2">$2\times10^{-7}C_4C_6$ J</td><td colspan="5">$7\times10^{-4}t^{0.75}C_4C_6$ J</td><td colspan="2">$1.2\times10^{-4}C_4C_6$ W</td></tr>
<tr><td>1 050~1 400</td><td>$2\times10^{3}C_6C_7$ W</td><td colspan="3">$2\times10^{-6}C_6C_7$ J</td><td colspan="4">$3.5\times10^{-3}t^{0.75}C_6C_7$ J</td><td colspan="2">$6\times10^{-4}C_6C_7$ W</td></tr>
<tr><td>1 400~1 500</td><td>8×10^{5} W</td><td colspan="4">8×10^{-4} J</td><td>$4.4\times10^{-3}t^{0.25}$ J</td><td>$5.4\times10^{-2}t^{0.25}$ J</td><td rowspan="4" colspan="3">10^{-2} W</td></tr>
<tr><td>1 500~1 800</td><td>8×10^{6} W</td><td colspan="5">8×10^{-3} J</td><td>0.1 J</td></tr>
<tr><td>1 800~2 600</td><td>8×10^{5} W</td><td colspan="4">8×10^{-4} J</td><td>$4.4\times10^{-3}t^{0.25}$ J</td><td rowspan="2">$5.4\times10^{-2}t^{0.25}$ J</td></tr>
<tr><td>2 600~4 000</td><td>8×10^{4} W</td><td>8×10^{-5} J</td><td colspan="4">$4.4\times10^{-3}t^{0.25}$ J</td></tr>
<tr><td>4 000~10^{6}</td><td>10^{11} W·m^{-2}</td><td>100 J·m^{-2}</td><td colspan="6">$5.6\times10^{3}t^{0.25}$ J·m^{-2}</td><td colspan="2">10^{3} W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td colspan="11">修正因子和单位见“表 1~表 4 的注”。</td></tr>
</table>

表 2　2 类激光产品的可达发射极限

<table>
<tr><th>波长 λ/nm</th><th>发射持续时间 t/s</th><th>2 类 AEL</th></tr>
<tr><td rowspan="2">400~700</td><td>$t<0.25$</td><td>与 1 类 AEL 相同</td></tr>
<tr><td>$t\geq0.25$</td><td>$C_6\times10^{-3}$ W*</td></tr>
<tr><td colspan="3">* 修正因子和单位见“表 1~表 4 的注”。</td></tr>
</table>

表 3　3A 类激光产品的可达发射极限

<table>
<tr><th>发射持续时间 t/s
波长 λ/nm</th><th><10^{-9}</th><th>10^{-9}～10^{-7}</th><th>10^{-7}～1.8×10^{-5}</th><th>1.8×10^{-5}～5×10^{-5}</th><th>5×10^{-5}～1×10^{-3}</th><th>1×10^{-3}～0.25</th><th>0.25～3</th><th>3～10</th><th>10～10^3</th><th>10^3～3×10^4</th></tr>
<tr><td>180～302.5</td><td rowspan="3">1.2×10^5 W 和 3×10^{10} W·m^{-2}</td><td colspan="9">1.2×10^{-4} J 和 30 J·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>302.5～315</td><td colspan="7">$4\times10^{-6}C_2$ J 和 C_2 J·m^{-2}($t>T_1$)
$4\times10^{-6}C_1$ J 和 C_1 J·m^{-2}($t<T_1$)</td><td colspan="2">$4\times10^{-6}C_2$ J 和 C_2 J·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>315～400</td><td colspan="7">$4\times10^{-6}C_1$ J 和 C_1 J·m^{-2}</td><td>4×10^{-2} J 和 10^4 J·m^{-2}</td><td>4×10^{-5} W 和 10 W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>400～700</td><td>1 000 C_6 W 和 5×10^6C_6 W·m^{-2}</td><td colspan="2">$10^{-6}C_6$ J 和 $5\times10^{-3}C_6$ J·m^{-2}</td><td colspan="3">$3.5\times10^{-3}t^{0.75}C_6$ J 和 $18t^{0.75}C_6$ J·m^{-2}</td><td colspan="4">$5\times10^{-3}C_6$ W 和 25 C_6 W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>700～1 050</td><td>1 000 C_4C_6 W 和 5×10^6C_4C_6 W·m^{-2}</td><td colspan="2">$10^{-6}C_4C_6$ J 和 $5\times10^{-3}C_4C_6$ J·m^{-2}</td><td colspan="6">$3.5\times10^{-3}t^{0.75}C_4C_6$ J 和 $18t^{0.75}C_4C_6$ J·m^{-2}</td><td>$6\times10^{-4}C_4C_6$ W 和 3.2 C_4C_6 W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>1 050～1 400</td><td>$10^4C_6C_7$ W 和 5×10^7C_6C_7 W·m^{-2}</td><td colspan="3">$10^{-5}C_6C_7$ J 和 $5\times10^{-2}C_6C_7$ J·m^{-2}</td><td colspan="5">$1.8\times10^{-2}t^{0.75}C_6C_7$ J 和 $90t^{0.75}C_6C_7$ J·m^{-2}</td><td>$3\times10^{-3}C_6C_7$ W 和 16 C_6C_7 W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>1 400～1 500</td><td>4×10^6 W 和 10^{12} W·m^{-2}</td><td colspan="4">4×10^{-3} J 和 10^3 J·m^{-2}</td><td colspan="2">$2.2\times10^{-2}t^{0.25}$ J 和 5 600 $t^{0.25}$ J·m^{-2}</td><td>$0.27t^{0.25}$ J 和 5 600 $t^{0.25}$ J·m^{-2}</td><td colspan="2" rowspan="4">5×10^{-2} W 和 10^3 W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>1 500～1 800</td><td>4×10^7 W 和 10^{13} W·m^{-2}</td><td colspan="6">4×10^{-2} J 和 10^4 J·m^{-2}</td><td>0.5 J 和 10^4 J·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>1 800～2 600</td><td>4×10^6 W 和 10^{12} W·m^{-2}</td><td colspan="4">4×10^{-3} J 和 10^3 J·m^{-2}</td><td colspan="2">$2.2\times10^{-2}t^{0.25}$ J 和 5 600 $t^{0.25}$ J·m^{-2}</td><td rowspan="2">$0.27t^{0.25}$ J 和 5 600 $t^{0.25}$ J·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>2 600～4 000</td><td>4×10^5 W 和 10^{11} W·m^{-2}</td><td>4×10^{-4} J 和 100 J·m^{-2}</td><td colspan="5">$2.2\times10^{-2}t^{0.25}$ J 和 $5.6\times10^3t^{0.25}$ J·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>4 000～10^6</td><td>10^{11} W·m^{-2}</td><td>100 J·m^{-2}</td><td colspan="6">$5.6\times10^3t^{0.25}$ J·m^{-2}</td><td colspan="2">10^3 W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td colspan="11">修正因子和单位见“表 1～表 4 的注”。</td></tr>
</table>

表 4　3B 类激光产品的可达发射极限

波长 λ/nm ＼ 发射持续时间 t/s	<10^{-9}	10^{-9}～0.25	0.25～3×10^{4}
180～302.5	3.8×10^{5} W	3.8×10^{-4} J	1.5×10^{-3} W
302.5～315	1.25×10^{4} C_2 W	1.25×10^{-5} C_2 J	5×10^{-5} C_2 W
315～400	1.25×10^{8} W	0.125 J	0.5 W
400～700	3×10^{7} W	0.03 J($t<0.06$ s) 0.5 W($t\geq0.06$ s)	0.5 W
700～1 050	3×10^{7} C_4 W	0.03 C_4J($t<0.06$ C_4 s) 0.5 W($t\geq0.06$ C_4 s)	0.5 W
1 050～1 400	1.5×10^{8} W	0.15 J	0.5 W
1 400～10^{6}	1.25×10^{8} W	0.125 J	0.5 W
修正因子和单位见“表 1～表 4 的注”。			

表 1～表 4 的注：

1　小于 10^{-9} s 的照射作用的资料有限。该照射时间内的 *AEL* 值由使用于 10^{-9} s 的辐照度、或辐照功率导出。

2　用下列表达式和图 1～图 8 的图解确定表 1～表 4 中的修正因子 C_1～C_7 及转效点 T_1 和 T_2。

参　　数	光谱范围/nm	图　　号
$C_1=5.6\times10^{3}t^{0.25}$	302.5 ～400	1
$T_1=10^{0.8(\lambda-295)}\times10^{-15}$s	302.5 ～315	2
$C_2=10^{0.2(\lambda-295)}$	302.5 ～315	3
$T_2=10\times10^{0.02(\lambda-550)}$s	550 ～700	4
$C_3=10^{0.015(\lambda-550)}$	550 ～700	5
$C_4=10^{0.002(\lambda-700)}$	700 ～1 050	6
$C_4=5$	1 050 ～1 400	6*
$C_5=N^{-1/4}$**	400 ～10^{6}	7
$C_6=1$　　$\alpha\leq\alpha_{min}$	400 ～1 400	—
$C_6=\alpha/\alpha_{min}$　　$\alpha_{min}<\alpha\leq\alpha_{max}$	400 ～1 400	—
$C_6=\alpha_{max}/\alpha_{min}$　　$\alpha>\alpha_{max}$	400 ～1 400	—
$C_7=1$	1 050 ～1 150	8
$C_7=10^{0.018(\lambda-1150)}$	1 150 ～1 200	8
$C_7=8$	1 200 ～1 400	8
* 不使用在 *AEL* 表中。见对皮肤的 *MPE*。 ** C_5 只适用于小于 0.25 s 的脉宽。		

3　限制孔径见表 7。

4　在表 1～表 4 和注的公式中，波长 λ 必须用纳米(nm)表示，发射持续时间 t 必须用秒(s)表示。

第三篇 用户指南

注：由于这些准则的性质，本篇在建议用户对激光产品采用安全防护和控制措施时，用“宜”一词进行修饰，并对3B类和4类激光的危害不加区分。至于是“宜”还是“应”采取这些控制措施，由用户自行规定。

10 安全防护措施

10.1 一般要求

本篇按照激光产品的危害分类，为用户使用激光产品规定了安全防护及控制措施。用户通常可采用制造厂商的激光产品类别对激光设备分类，从而避免所有测量。本篇仅供用户参考，不应作为限制或要求强加给制造厂商。若有大于3A类的激光设备，宜指定一名激光安全员。激光安全员负责检查下述的防护措施并执行相应的控制措施。对于3B类或4类激光器应使用可靠的防护围封，防护围封可移动部位或检修接头处应贴有警告标记，以避免围封部分分离或接头断开时造成的危害。

采用安全防护及控制措施的目的是为了减小有害的激光辐射照射及其他伴随危害的可能性，因而，可以不必采用所有的控制措施。当使用某一条或几条控制措施就使可能的照射降到相应的或比它低的 *MPE* 时，则不必再采用其他控制措施。

如果用户对原已分类的激光产品的改动，影响产品在本标准范围内的特性或预定功能，则参与改动的人员或组织，有责任对该激光产品重新分类和标记。

10.2 遥控联锁连接器的使用

4类和3B类激光器（在400 nm～700 nm波长范围内发射不超过2类 *AEL* 值5倍的3B类激光器除外）的遥控联锁连接器宜与应急主控断接联锁装置或房间、门或固定的联锁装置相连接（见4.4）。

允许专职人员使遥控联锁连接器暂时失效，以便其他指定人员进入，此时入口处不允许有任何光辐射危害。

10.3 钥匙控制器

3B类和4类激光产品在不使用时，宜取出钥匙控制器的钥匙，以防未经许可的使用（见4.5）。本要求不适用于400 nm～700 nm波长范围内发射不超过2类 *AEL* 值5倍的3B类激光产品。

10.4 光束终止器或衰减器

尽可能使用光束衰减器或终止器避免旁观者受到3B类或4类激光产品的意外照射（见4.7），对于在400 nm～700 nm波长范围内发射不超过2类 *AEL* 值5倍的3B类激光产品可以使用其他方法。

10.5 警告标志

3B和4类激光产品工作区或其防护围封的入口处，宜加贴相应的警告标志。

10.6 光路

对2类、3A类、3B类或4类激光产品宜通过在发射的激光束有用光路的末端设置一具有适当反射率及热性能的漫反射材料或用吸收体使光路终止。

开放式激光光路的设置宜高于或低于人眼的水平高度。

3B类和4类激光器的光路要尽可能短，尽量少改变方向，避免横穿人行通道及其他过道，并且如果可能的话，宜将光路封闭起来。光束的围封（如：管道）尽可能安装牢固，但最好不要与形成光束的元件固定连接（或为其提供支撑）。

10.7 镜反射

尽可能注意防止3B类或4类激光辐射的意外镜反射。反射镜、透镜及分束器尽可能安装牢固，且当激光发射时仅能受控移动。

对3B类和4类激光器，需要特别注意光学元件的选择及其表面的维护清理。

具有潜在危险的镜反射出现在透射光学元件（如透镜、三棱镜、透射窗和分束器）的所有表面。

具有潜在危险的辐射也可通过一些反射光学元件（如反射镜）传输。

10.8 眼防护装置

选定适当的防护镜时，应考虑下列因素：

a）工作波长；

b）辐照量或辐照度；

c）最大允许照射量（*MPE*）；

d）防护镜对激光输出波长的光密度；

e）可见光透射要求；

f）损坏防护镜的辐照量或辐照度；

g）对防护镜片的质量要求；

h）舒适和通风；

i）吸收介质特性的退化或改变（即使是短暂的或瞬间的情况，也应考虑）；

j）材料强度（抗冲击性）；

k）周边视觉的要求；

l）其他相关的国家规定。

为有效防护特定的激光辐射而设计的眼防护装置应用于使用3B类或4类激光器的所有危害区域（见第12章）。本要求不适用于波长400 nm～700 nm范围内发射不超过2类*AEL*值5倍的3B类激光产品。其他例外情况为：

a）工程设计和管理控制排除了超过相应*MPE*的潜在照射；

b）由于特殊操作要求不能使用眼防护装置时，此类操作程序宜只有经激光安全员批准后才能进行。

10.8.1 防护镜的识别

所有激光防护镜应有明显的标记，并附有正确选择适用于特定激光的防护镜的详细说明。

10.8.2 要求的光学密度

通常激光防护镜的光谱光学密度D_λ的波长依赖性很高，若需要防护某一波段的激光辐射时，应引用该波段内所测出的最小D_λ值，眼防护所需的D_λ值可通过下面公式计算：

$$D_\lambda = \log_{10} \frac{H_0}{MPE}$$

式中：H_0——预计未防护眼睛可能受到的辐照量。

10.8.3 防护镜

防护镜尽可能配戴舒适，提供视野尽可能宽广，既有一定的密封性又有良好的透气性以避免蒙雾，还要有适当的可见光透射。要尽可能避免使用能产生有害镜反射的平面反射镜片。框架及侧面部分应有与镜片相当的防护能力。

选择4类激光器的防护镜时，需要特别注意其对激光辐射性的可承受性和稳定性。

10.9 防护服

尽可能为可能受到超过皮肤*MPE*值的辐射照射的工作人员提供适宜的防护衣，特别是4类激光产品可能造成火灾，宜用合适的耐火、耐热材料制作防护衣。

选择4类激光器的防护服时，需要特别注意给出抗激光辐射性和激光辐射稳定性。

10.10 培训

操作3A类、3B类及4类激光系统不仅会对使用者而且会对相当一段距离之外的其他人员造成危害。

由于存在这种潜在危害，所以只有受过一定水平培训的人员才能进行这项工作。可由制造厂商或系统供给者，激光安全员或被认可的外部单位负责组织人员培训。培训宜包括以下内容，但不局限于此：

a）熟悉系统的工作过程；

b）正确执行危害控制程序和正确使用警告标志等；

c）个人防护的需求；

d）事故报告程序；

e）激光对眼和皮肤的生物效应。

另见第12章。

10.11 医学监督

在尚无相应的国家规定时，宜考虑以下建议：

a）对激光工作者进行医学监督的价值是医学界尚未解决的基本问题。如果进行眼的检查，宜由有资格的专家来承担且仅限于检查使用3B类和4类激光器的工作人员；

b）在眼受到明显的或可疑的致伤照射后，尽可能立即由有资格的专家进行医学检查，这样的检查还需尽可能包括对发生事故的环境进行充分的生物物理学调查；

c）对于使用3B类和4类激光器的作业人员从事该工作前、工作期间和离开该工作岗位之后的眼检查仅具有医学法律价值，而不是安全方案所必须的一部分。

11 使用激光器的伴随危害

根据所用激光器的类型，激光工作中的伴随危害可能包括以下几个方面：

11.1 大气污染

a）由激光切割、激光打孔及激光焊接产生的靶材气化物和反应产物，其中可能包括石棉、一氧化碳、二氧化碳、臭氧、铅、汞、其他金属及生物材料。

b）流动气体激光系统的漏气或激光反应副产物中的气体，如溴气、氯气及氰化氢。

c）由低温致冷剂产生的气体或蒸汽。

d）用于辅助激光-靶标相互作用的气体，如氧气。

11.2 伴随辐射危害

11.2.1 紫外伴随辐射

由闪光灯及连续激光放电管发出的紫外辐射可能是相当有害的，尤其在使用紫外波导管或反射镜（如石英）时，危害相当严重。

11.2.2 可见及红外伴随辐射

由闪光灯管、泵源以及靶的再辐射产生的可见及近红外辐射可能具有足以产生潜在危害的辐亮度。

11.3 电气危害

大多数使用高压（>1 kV）的激光器和脉冲激光器特别危险，因为其电容器组储有能量。

这类电路器件如阳极工作电压大于5 kV的电子管，可能发射X射线，应进行适当屏蔽。

11.4 低温致冷剂

低温液体可能引起灼伤因而需要特殊的处理措施。

11.5 材料加工

用于加工材料的激光产品的技术规范可根据其用途而改变。用户如果希望加工制造厂商推荐之外的材料，则宜了解与这种材料加工有关的危险和危害的不同程度，并采取相应的防范措施，如：预防产生有毒气体、着火、爆炸或来自工件的反射激光辐射。

11.6 其他危害

一些高功率激光系统工作期间，可能会发生电容器组或光泵系统的爆炸，在激光切割、打孔及焊接期间，靶标处可能发生颗粒飞溅。化学激光器反应剂或实验室内使用的其他气体也有可能发生爆炸反应。

12 危害控制措施

12.1 一般要求

在评估激光可能带来的危害，并采取措施时，需考虑激光器使用的三个方面：

a) 激光器或激光系统致伤人员的能力，其中包括人员接触主出射孔或附助窗口的情况；

b) 激光器的作业环境；

c) 操作激光器或可能受到激光照射的人员的培训水平。

评估并控制激光辐射危害的实际方法是：根据激光器或激光系统相关的危害程度进行分类，再对每类激光产品制定出相应的控制措施。大多数情况下，用户在使用已分类的系统时不必再进行辐射测量。

分类方案具体关系到激光装置发射的可达发射水平和建立在系统物理特性基础上的潜在危害。但是，环境因素及人员因素也与所需的控制措施有关，宜指派一名可靠人员作为激光安全员，在本标准中未列出的情况下负责提供有根据的判断。

下述内容与激光产品的安全使用有关：

——在室外及施工场合下，管理控制通常是唯一合理的安全措施；

——在实验室及车间里，工程控制最起作用；

——在激光显示及演示环境中，预先计划，图示及出人口管理，通常是唯一切实可行的安全措施。

12.2 室外使用的3B类及4类激光产品的危害评估

3B类及4类激光产品的潜在危害可扩展到相当的距离范围之外。激光辐照度或辐照量下降到相应的*MPE*时，对应的距离称为标称眼危害距离(*NOHD*)，光束辐照度或辐照量超过相应的*MPE*区域称为标称眼危害区(*NOHA*)，该区域由激光束横向、纵向限度及激光系统的精确方位所界定，并延伸到*NOHD*的限值或靶标与终止器的位置，精确的*NOHA*还取决于光路内各种材料的性质，如镜面反射器等。

*NOHD*取决于激光输出特性、相应的*MPE*、使用的光学系统类型和大气对光束传输的响应。计算*NOHD*的公式和实例在附录A中给出。

12.3 个人防护

应通过管理控制、工程设计及光束封闭等措施，使得激光作业对个人防护的要求降至最低。

当工作人员可能受到具有危害的激光辐射(3B类及4类)照射时，应提供有效的个人防护措施。

12.4 激光演示、显示及展示

在非监控区域内尽可能只用1类或2类激光产品供演示、显示或娱乐之用。若更高类别的激光产品用于这些用途，则激光产品的操作宜由有经验的、受过良好培训的操作者执行和/或采取措施使现场人员免受超过相应*MPE*水平的照射。

供学校教学等使用的每个演示激光产品应满足1类或2类激光产品的所有相应要求。且不允许人员接近超过1类或2类可达发射极限的激光辐射。

12.5 实验室和车间内的激光设施

12.5.1 2类和3A类激光产品

对此类激光产品只需采取措施防止连续直视激光束。意外观看时，受到的瞬间(0.25 s)照射不认为是有害的，但是激光束不宜有意指向人。对于3A类激光产品使用光学观察仪器(如双目镜)观看可能是有害的。对3A类激光产品的其他防护措施在12.6.2中给出。

12.5.2 3B类激光产品

无防护眼直视(光束内视)3B类激光束或其镜反射光束有潜在危害。为避免直视激光束和控制镜反射，宜采取下列防护措施：

a) 只能在受控区内操作激光产品；

b) 注意防止意外的镜反射；

c）尽可能使激光束在有用光路末端终止于漫反射材料，该材料的颜色和反射率应使得光束位置尽可能调准，且反射危害最小。

注：观看 3B 类可见激光漫反射的安全条件是：光屏到角膜的最短距离为 13 cm，最长观察时间为 10 s。其他观察条件需要将漫反射照射同 *MPE* 进行比较。

d）如果有可能直接观看激光束或其镜反射，或观看不满足条件 c）的漫反射时，需要配戴防护镜。

e）3B 类激光工作区的入口处宜贴有标准激光警告标志。

12.5.3 4 类激光产品

4 类激光产品的出射光束或其镜反射以及漫反射都能引起损伤，而且可能造成火灾。为使这些危险降至最小，除采取 12.5.2 的措施外，还宜采取下列控制措施。

a）光路宜封闭。在激光器运行期间，只允许配戴合适的激光防护镜并穿有防护衣的人员进入激光操作区。

光路宜避开操作区，所安装的光路长管应做到热膨涨、振动和其他致动因素对形成光束的元件的调准无明显影响；

b）对 4 类激光产品宜采用遥控操作，从而避免工作人员直接进入激光工作区；

c）在需配戴激光防护镜的区域，一定要有良好的室内照明，浅色漫反射墙面有助于获得这种环境。

d）光学元件的热致畸变和激光束对固体靶标的熔化和蒸发，通过 4 类激光辐射均会诱发潜在的起火危险。应提供合适的光束终止器，最好选择充分冷却的金属或石墨靶标。很高功率密度的辐射可以通过多次反射吸收加以控制，每个反射面相对于入射辐射的倾斜角度应使激光功率分散在一个较大的区域。

e）可采取特殊措施防止不必要的不可见远红外激光的反射，并且光束及靶标周围应由不透这种波长激光的材料环绕（对于波长 10.6 μm 的 CO_2 激光，甚至暗淡的金属表面也会形成高度的镜反射）。

尽可能采用局部屏蔽以减少反射辐射的程度。

f）4 类激光光路中光学元器件的准直情况应进行初始检查和周期性检查。

12.6 室外及施工中的激光设施

12.6.1 2 类激光产品

尽可能在激光有用光路末端予以终止，且激光不应指向人员（在头的高度）。

12.6.2 用于测量、准直、调平的 3A 类激光产品

a）只有合格的且训练有素的工作人员，经激光安全员认可后才能安装、调整和操作激光设备。

b）在激光作业场所，宜贴有标准的激光警告标志。

c）尽可能采用机械或电子手段协助校准激光器。

d）尽可能采取措施确保人员不直视激光束（长时间直视激光是有害的）。用光学仪器（经纬仪等）直接观看激光束可能有害，因而在没有得到激光安全员特许的情况下，不允许这样做。

e）激光束宜在有用光路末端予以终止，且不论何种情况下，有害光路（至 *NOHD*）一旦超出受控区都应被终止。

f）激光光路宜设置在高于或低于人眼高度的位置。

g）尽可能采取措施保证激光束不随意指向类似镜子一样的表面（最重要的是镜平面）。

h）激光器不用时宜妥善保存在未经授权人员不能接触的地方。

12.6.3 3B 类及 4 类激光产品

在室外及类似的环境使用 3B 类和 4 类激光产品，只能由对这种激光产品的使用接受过充分培训，并得到激光安全员许可的人员执行操作。为使可能的危害降至最小，除 12.6.2 给出的要求外还应采取以下措施：

a）尽可能把人员控制在光束辐照度或辐照量大于 *MPE* 的光路之外，除非他们戴有合适的防护镜并穿有防护衣。尽可能采取诸如物理屏障，限制光束纵、横方位的联锁装置之类的工程控制措施，以加强

管理控制。

一种可替换的解决办法是把操作人员安置在一局部围封内，该局部围封可以防护漂移光束，并且四周具有良好可见度。

b）尽可能禁止在标称眼危害距离内有意追踪非目标交通车辆或飞机。

c）光路内宜清除可能产生意外反射的所有表面，这种反射具有潜在的危害或使有危害区相应扩大。

d）虽然直接光束内视 3B 类激光器通常是有害的，但在下列条件下通过漫反射器观看激光束是安全的：

——光屏至角膜的最短距离为 13 cm；

——最长观看时间为 10 s。

如果这两个条件中有一个不满足，则必须认真估算这种危害。

12.6.4 测绘、准直及调平用激光产品

尽可能使用 1 类或 2 类激光产品作测绘、准直及调平之用。但在某些高背景光的环境中需要使用更高输出功率的激光器，如果使用 3A 类激光器，则应遵守 12.6.2 的要求。在必须使用 3B 类激光器的情况下应遵守 12.6.3 的要求。此外，不允许人员接触波长为 400 nm～700 nm、辐射功率大于 5×10^{-3} W、发射时间超过 3.8×10^{-4} s 的激光辐射，也不允许人员接触任何超过 1 类 *AEL* 的其他发射时间和波长范围内的激光辐射。

13 最大允许照射量

13.1 一般要求

最大允许照射量（*MPE*）是为用户提供的，其值低于已知的危害水平，它以现有的实验研究为基础。*MPE* 值是控制照射量的指南，而不是确定安全与危害水平的严格分界线。在任何情况下，激光辐射照射量都宜低。若一台激光器同时发射波长相差很大的几种辐射或脉冲激光叠加在连续波激光上，危害计算可能很复杂。

如果满足下述条件，则宜将几个不同波长的照射看作是按照表 6 和表 8 给出的 *MPE* 值按光谱效应比例叠加的结果。

a）脉冲宽度或照射时间在一个数量级内；

b）有叠加效应的光谱效应在表 5 中列出。其中符号（o）表示对眼照射，用符号（s）表示对皮肤照射。

表 5 不同谱段的辐射对眼（o）及皮肤（s）的叠加效应

光谱范围*	UV-C 和 UV-B 180 nm～315 nm	UV-A 315 nm～400 nm	可见光和 IR-A 400 nm～1 400 nm	IR-B 和 IR-C 1 400 nm～10^6 nm
UV-C 和 UV-B 180 nm～315 nm	o s			
UV-A 315 nm～400 nm		o s	s	o s
可见光和 IR-A 400 nm～1 400 nm		s	o s	s
IR-B 和 IR-C 1 400 nm～10^6 nm		o s	s	o s

* 光谱范围的定义见表 B1。

无叠加效应的辐射波长，其危害应分开计算。对于有叠加效应的波长，当其脉宽或发射时间不在一

个数量级内(例如同时受到脉冲辐射和连续波辐射的照射)时,需格外小心。

13.2 限制孔径

应用一适当孔径供所有照射量值的测量和计算之用。这就是限制孔径且其定义为一个圆域的直径,辐照度或辐照量在该圆域平均。限制孔径在表7中给出。

注:可见激光和近红外激光辐射对眼的这些照射量值是在7 mm直径(瞳孔最大直径)上测量的。对于更小的瞳孔直径,将不修正 *MPE* 值。

13.3 重复脉冲激光器或调制激光器

由于现有的有关多脉冲激光照射准则的数据有限,因此在评估重复脉冲辐射照射时必须谨慎。在确定用于重复照射的 *MPE* 时,宜采用下列方法。

按下述a)、b)和c)中限制性最强的要求确定在波长400 nm～10^6 nm的 *MPE* 值。对于其他波长,则按a)和b)中限制性最强的要求确定 *MPE* 值。

按a)和b)中限制性最强的要求确定在其他波长对眼照射的 *MPE* 或对皮肤照射的 *MPE*。

a) 脉冲串中任一单脉冲的照射量不应超过单脉冲的 *MPE*。

b) 持续时间为 T 的脉冲串的平均辐照度不应超过分别在表6和表8中脉宽为 T 的单脉冲的 *MPE*。

c) 脉冲串中任一单个脉冲的照射量不得超过单脉冲的 *MPE* 值与修正因子 C_5[1]之积:

$$MPE_{串} = MPE_{单} \times C_5$$

式中:$MPE_{串}$——脉冲串中任一单脉冲的照射量;

$MPE_{单}$——单脉冲的 *MPE* 值;

C_5——$N^{-1/4}$;

N——照射时间内所预期的脉冲总数。

在有些情况下,这个值可降到低于在相同峰值功率下用相同照射时间连续照射的 *MPE*。在这些条件下可用连续照射的 *MPE*。

13.4 测量条件

为了估算实际照射量,应采用下列测量条件。

13.4.1 用辐照度或辐照量表示的值应在按照表7选用的一圆形限制孔径光阑上取平均。在400 nm～1 400 nm的波长范围内,眼照射量应使用100 mm的最小测量距离。

13.4.2 测量对向角 α 大于 α_{min} 且波长在400 nm～1 400 nm之间的表观光源的辐照度或辐照量时,应采用直径为7 mm,有效接收角为 α 的圆形测量孔径来估算眼睛的 *MPE*。但是如果 $\alpha > \alpha_{max}$,则接收角等于 α_{max}。

如果表观光源由多点组成,或者是对向角大于 α_{min} 的线光源,其波长范围为400 nm～1 400 nm,则应对每个单光点或光点组进行测量或估算,应确保照射量不超过每个局部区域的任一可能对向角 α 的 *MPE* 值,这里 $\alpha_{min} \leqslant \alpha \leqslant \alpha_{max}$,对整个光源所用的接收角不大于 α_{max}。

在确定 *MPE* 值时,应由光源两角尺寸的算术平均值确定矩形光源或线光源对向角的值。在求平均之前,任何大于 α_{max} 或小于1.5 mrad的角都应分别限制为 α_{max} 或1.5 mrad。

13.5 扩展光源激光器

尽管在有些情况下,对点光源 *MPE* 的下列修正,可用于激光阵列和扩展光源漫反射的激光输出,但限制在观察漫反射的大多数情况。例子在附录A中提供。

对波长400 nm～1 400 nm的扩展源激光辐射(如:漫反射观察),光源的对向角 α(在观察者眼睛处测量)大于 α_{min} 时,光束内视的 *MPE* 值可被下列因子 C_6 所放大。

1) C_5 只适用于脉宽小于0.25 s的情况。

表 6 激光辐射照射在角膜上的最大允许照射量(MPE)[1),2)]

<table>
<tr><th>发射持续时间 t/s
波长 λ/nm</th><th>$<10^{-9}$</th><th>10^{-9} ~ 10^{-7}</th><th>10^{-7} ~ 1.8×10^{-5}</th><th>1.8×10^{-5} ~ 5×10^{-5}</th><th>5×10^{-5} ~ 1×10^{-3}</th><th>1×10^{-3} ~ 10</th><th>$10\sim10^{3}$</th><th>$10^{3}\sim10^{4}$</th><th>$10^{4}\sim3\times10^{4}$</th></tr>
<tr><td>180~302.5</td><td rowspan="3">3×10^{10} W·m^{-2}</td><td colspan="8">30 J·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>302.5~315</td><td colspan="5">C_1 J·m^{-2}($t<T_1$)
C_2 J·m^{-2}($t>T_1$)</td><td colspan="3">C_2 J·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>315~400</td><td colspan="5">C_1 J·m^{-2}</td><td>10^4 J·m^{-2}</td><td colspan="2">10 W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>400~550</td><td rowspan="2">$5\times10^{6}C_6$ W·m^{-2}</td><td colspan="2" rowspan="2">$5\times10^{-3}C_6$ J·m^{-2}</td><td colspan="3" rowspan="2">18 $t^{0.75}C_6$ J·m^{-2}</td><td colspan="2">$10^{2}C_6$ J·m^{-2}</td><td>$10^{-2}C_6$ W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>550~700</td><td colspan="2">$18t^{0.75}C_6$ J·m^{-2} ($t<T_2$)
$10^{2}C_3C_6$ J·m^{-2} ($t>T_2$)</td><td>$10^{-2}C_3C_6$ W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>700~1 050</td><td>$5\times10^{6}C_4C_6$ W·m^{-2}</td><td colspan="2">$5\times10^{-3}C_4C_6$ J·m^{-2}</td><td colspan="4">18 $t^{0.75}C_4C_6$ J·m^{-2}</td><td colspan="2">3.2 C_4C_6 W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>1 050~1 400</td><td>$5\times10^{7}C_6C_7$ W·m^{-2}</td><td colspan="3">$5\times10^{-2}C_6C_7$ J·m^{-2}</td><td colspan="3">90 $t^{0.75}C_6C_7$ J·m^{-2}</td><td colspan="2">16 C_6C_7 W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>1 400~1 500</td><td>10^{12} W·m^{-2}</td><td colspan="4">10^3 J·m^{-2}</td><td>5 600 $t^{0.25}$ J·m^{-2}</td><td colspan="3" rowspan="4">10^3 W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>1 500~1 800</td><td>10^{13} W·m^{-2}</td><td colspan="5">10^4 J·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>1 800~2 600</td><td>10^{12} W·m^{-2}</td><td colspan="4">10^3 J·m^{-2}</td><td>5 600 $t^{0.25}$ J·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>2 600~10^6</td><td>10^{11} W·m^{-2}</td><td>100 J·m^{-2}</td><td colspan="4">5 600 $t^{0.25}$ J·m^{-2}</td></tr>
</table>

1) 修正因子和单位见"表 1~表 4 的注"。

2) 小于 10^{-9} s 的照射作用的资料有限。该照射时间内的 MPE 值由使用于 10^{-9} s 的辐照度导出。

这里

$\alpha_{min}=1.5$ mrad　　$t<0.7$ s

$\alpha_{min}=2\ t^{3/4}$ mrad　　$0.7\ s\leqslant t<10$ s

$\alpha_{min}=11$ mrad　　$t\geqslant 10$ s

修正因子 C_6 如下：

$C_6=1$　　$\alpha\leqslant\alpha_{min}$

$C_6=\alpha/\alpha_{min}$　　$\alpha_{min}<\alpha\leqslant\alpha_{max}$

$C_6=\alpha_{max}/\alpha_{min}$　　$\alpha>\alpha_{max}$

注：对于熟悉辐射亮度这一辐射量值的读者，对向角大于 0.1 弧度(即 $\alpha>\alpha_{max}=100$ mrad)的光源的 MPE 由下列等效的等式给出：

$L_{MPE}=8.5\times10^3 sr^{-1}\times MPE_{点光源}$　　$t<0.7$ s

$L_{MPE}=6.4\ t^{-3/4}\times10^3\ sr^{-1}\times MPE_{点光源}$　　$0.7\ s\leqslant t<10$ s

$L_{MPE}=1.15\times10^3\ sr^{-1}\times MPE_{点光源}$　　$t\geqslant 10$ s

表 7　用于测量激光辐照度和辐照量的孔径

光谱范围/nm	持续时间/s	孔　径	
		眼睛/mm	皮肤/mm
180～400	$t\leqslant3\times10^4$	1	1
400～1 400	$t\leqslant3\times10^4$	7	3.5
1 400～10^5	$t\leqslant3$	1	1
1 400～10^5	$t>3$	3.5	3.5
10^5～10^6	$t\leqslant3\times10^4$	11	11

表 8　激光辐照皮肤的最大允许照射量(MPE)[1),2)]

<table>
<tr><th>照射时间 t/s
波长 λ/nm</th><th>$<10^{-9}$</th><th>10^{-9}～10^{-7}</th><th>10^{-7}～10</th><th>10～10^3</th><th>10^3～3×10^4</th></tr>
<tr><td>180～302.5</td><td rowspan="3">3×10^{10} W·m^{-2}</td><td colspan="5">30 J·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>302.5～315</td><td colspan="2">C_2 J·m^{-2}($t>T_1$)
C_1 J·m^{-2}($t<T_1$)</td><td colspan="2">C_2 J·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>315～400</td><td colspan="2">C_1 J·m^{-2}</td><td>10^4 J·m^{-2}</td><td>10 W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>400～700</td><td>2×10^{11} W·m^{-2}</td><td>200 J·m^{-2}</td><td>$1.1\times10^4\ t^{0.25}$ J·m^{-2}</td><td colspan="2">2 000 W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>700～1 400</td><td>$2\times10^{11}\ C_4$ W·m^{-2}</td><td>200 C_4 J·m^{-2}</td><td>$1.1\times10^4\ C_4\ t^{0.25}$ J·m^{-2}</td><td colspan="2">2 000 C_4 W·m^{-2}</td></tr>
<tr><td>1 400～10^6</td><td>10^{11} W·m^{-2}</td><td>100 J·m^{-2}</td><td>5 600 $t^{0.25}$ J·m^{-2}</td><td colspan="2">1 000 W·m^{-2} [3)]</td></tr>
<tr><td colspan="6">1）修正因子和单位见"表 1～表 4 的注"。
2）小于 10^{-9} s 的照射作用的资料有限。该照射时间内的 MPE 值由使用于 10^{-9} s 的辐照度导出。
3）如果被照射皮肤面积大于 0.1 m^2，则 MPE 减少到 100 W·m^{-2}。如果被照射皮肤面积在 0.01 m^2 到 0.1 m^2 之间，则 MPE 的变化与被照射皮肤的面积成反比。</td></tr>
</table>

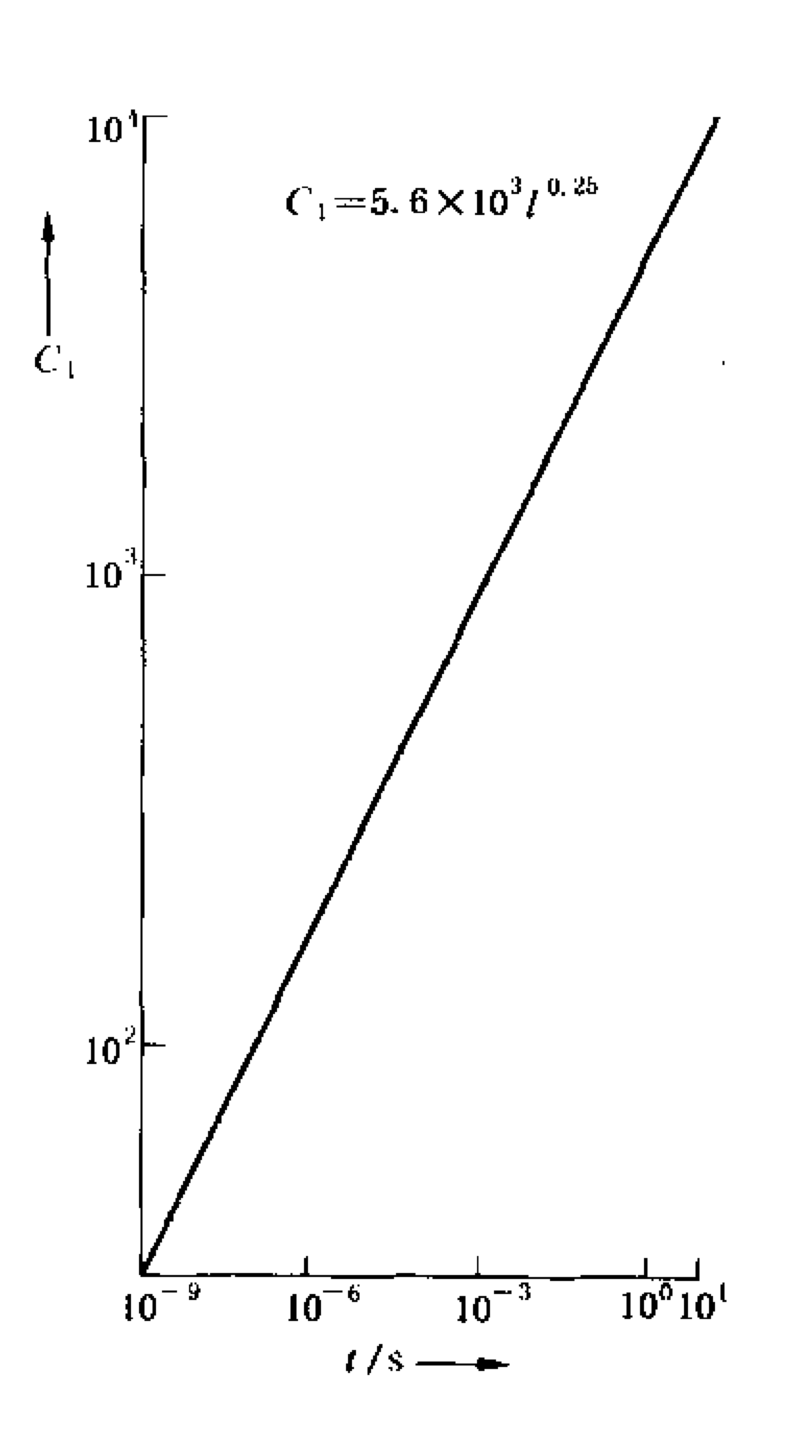


图 1 发射时间 10^{-9} s～10 s 的修正因子 C_1

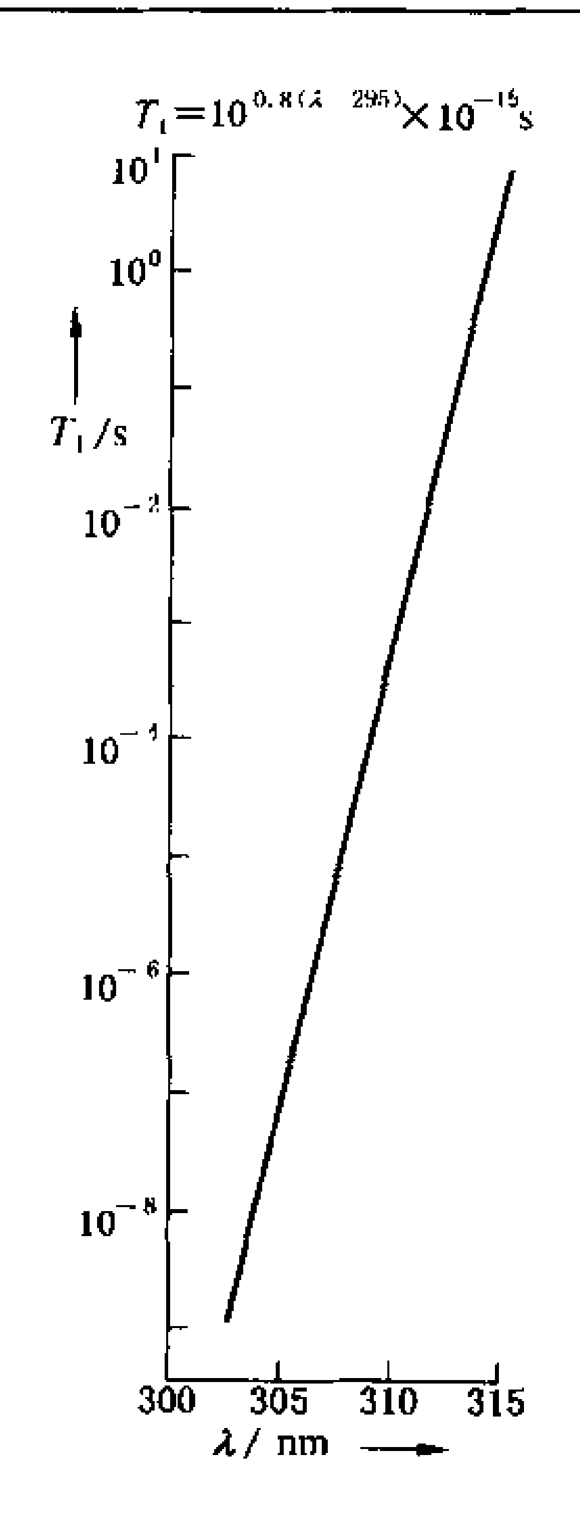


图 2 波长 λ=302.5 nm～315 nm 的转效点 T_1

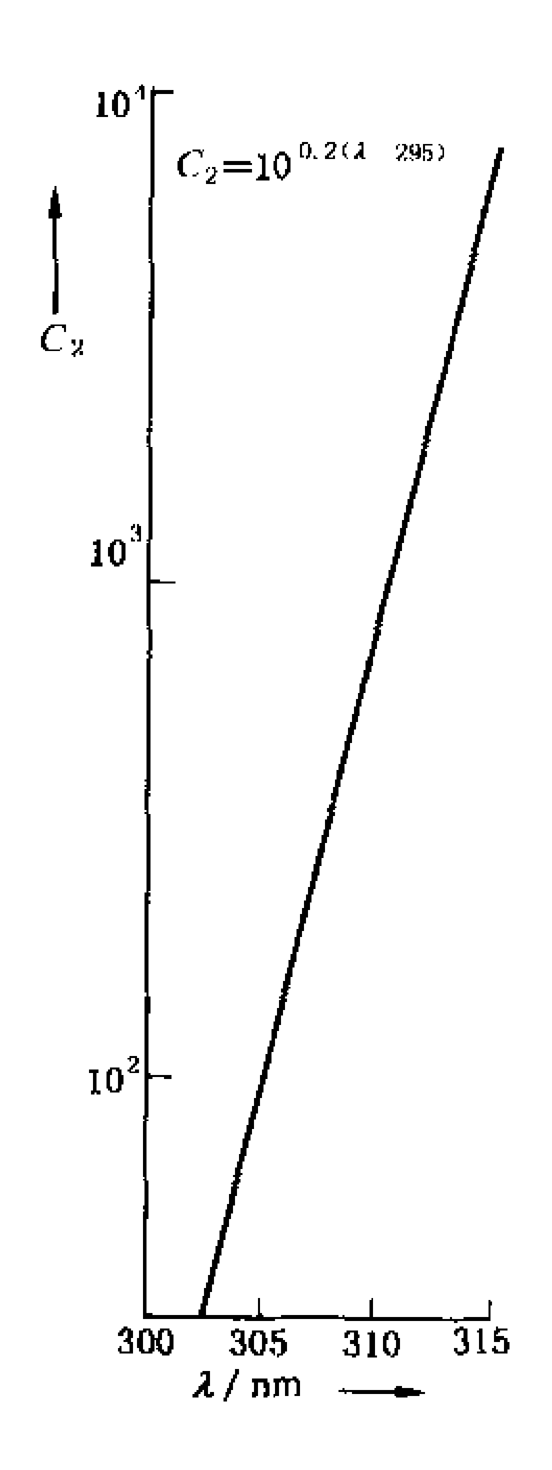


图 3 波长 λ=302.5 nm～315 nm 的修正因子 C_2

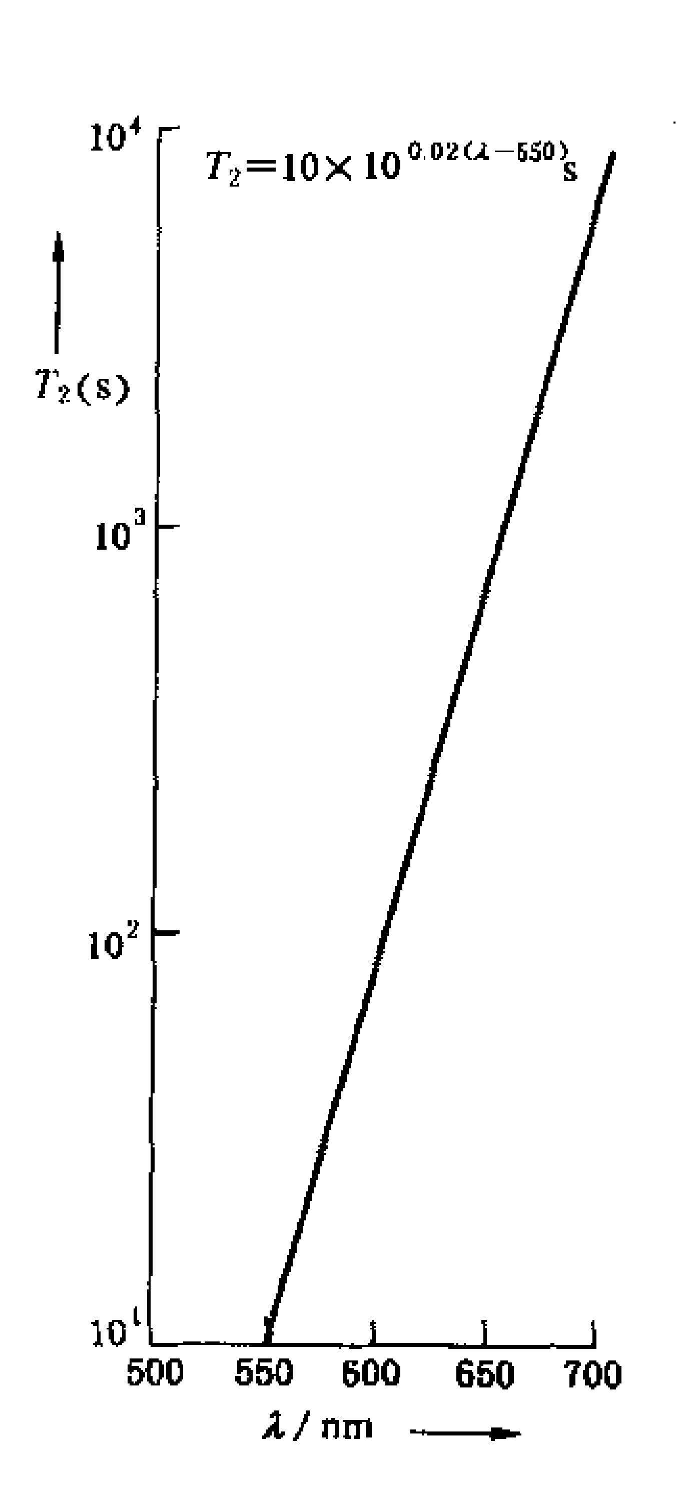


图 4 波长 λ=550 nm～700 nm 的转效点 T_2

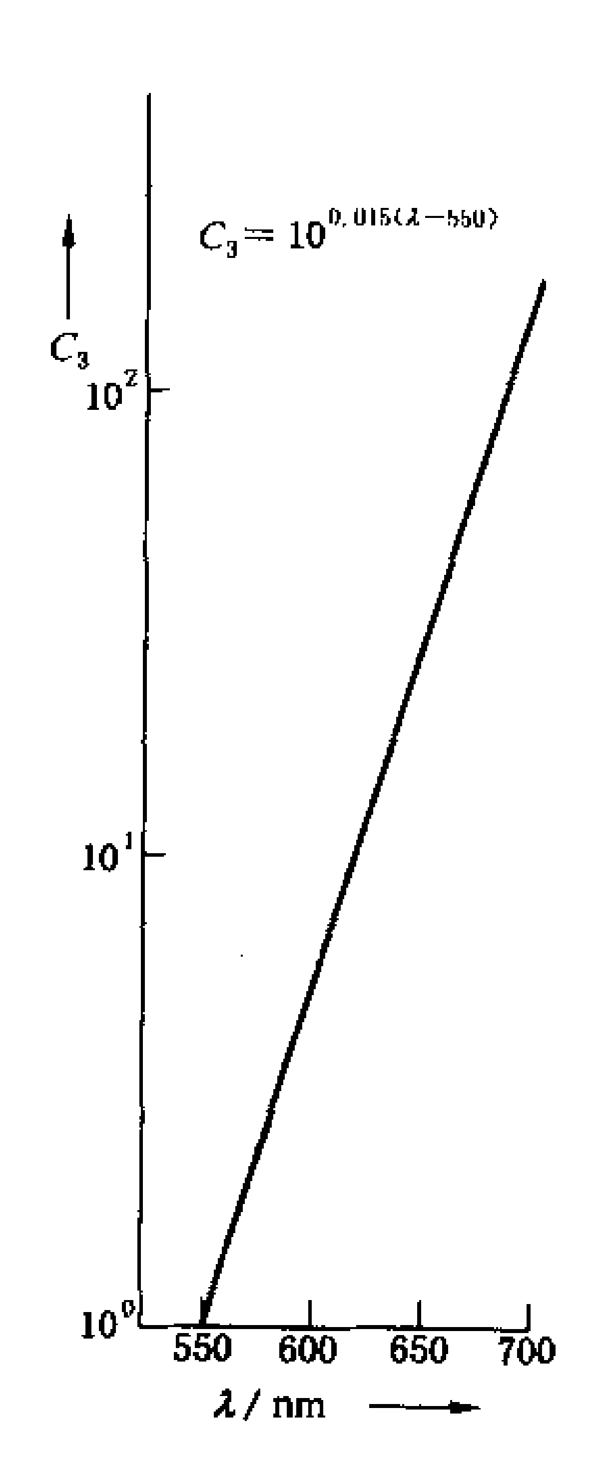


图 5 波长 λ=550 nm～700 nm 的修正因子 C_3

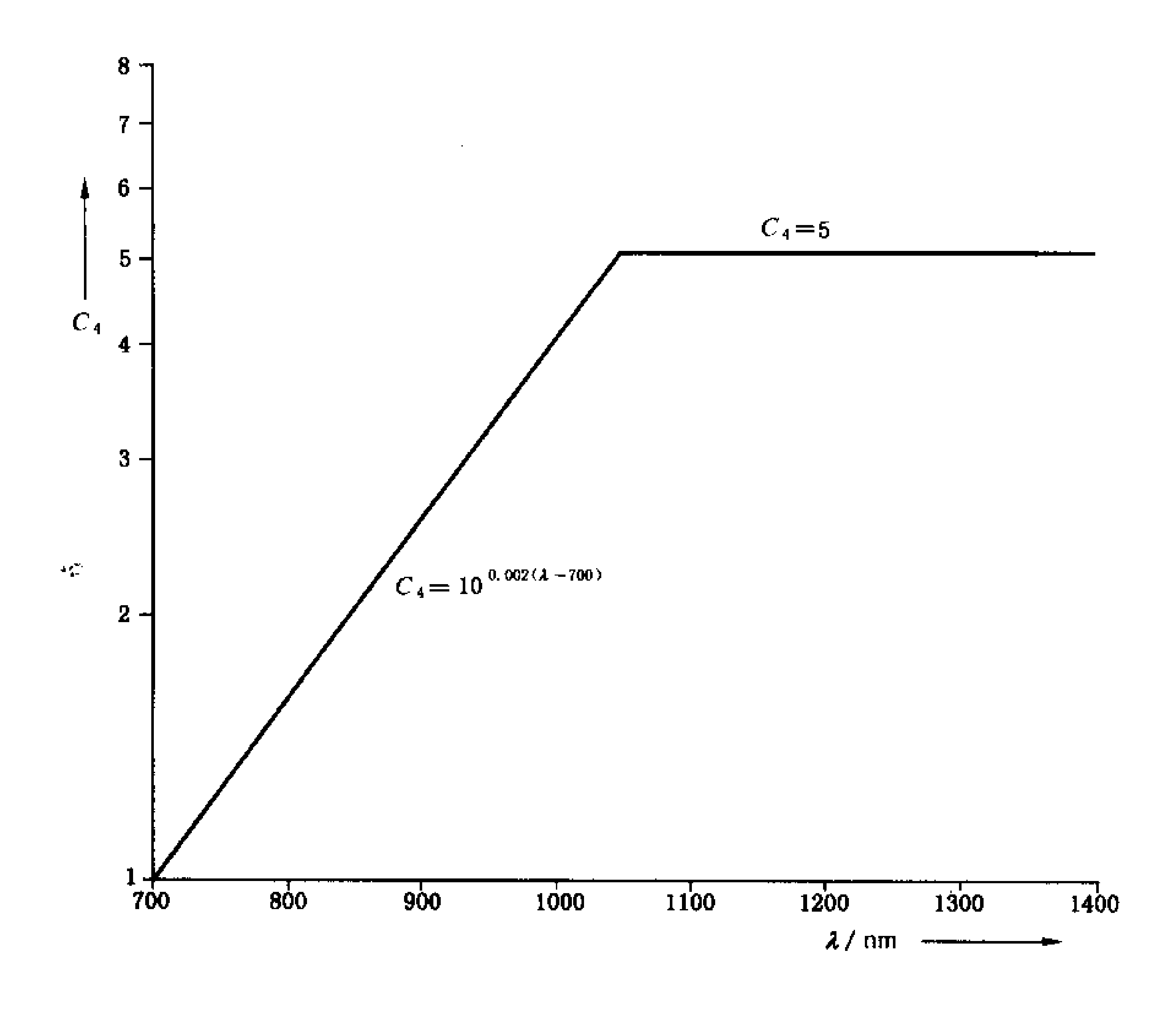


图 6　波长 λ=700 nm～1 400 nm 的修正因子 C_4

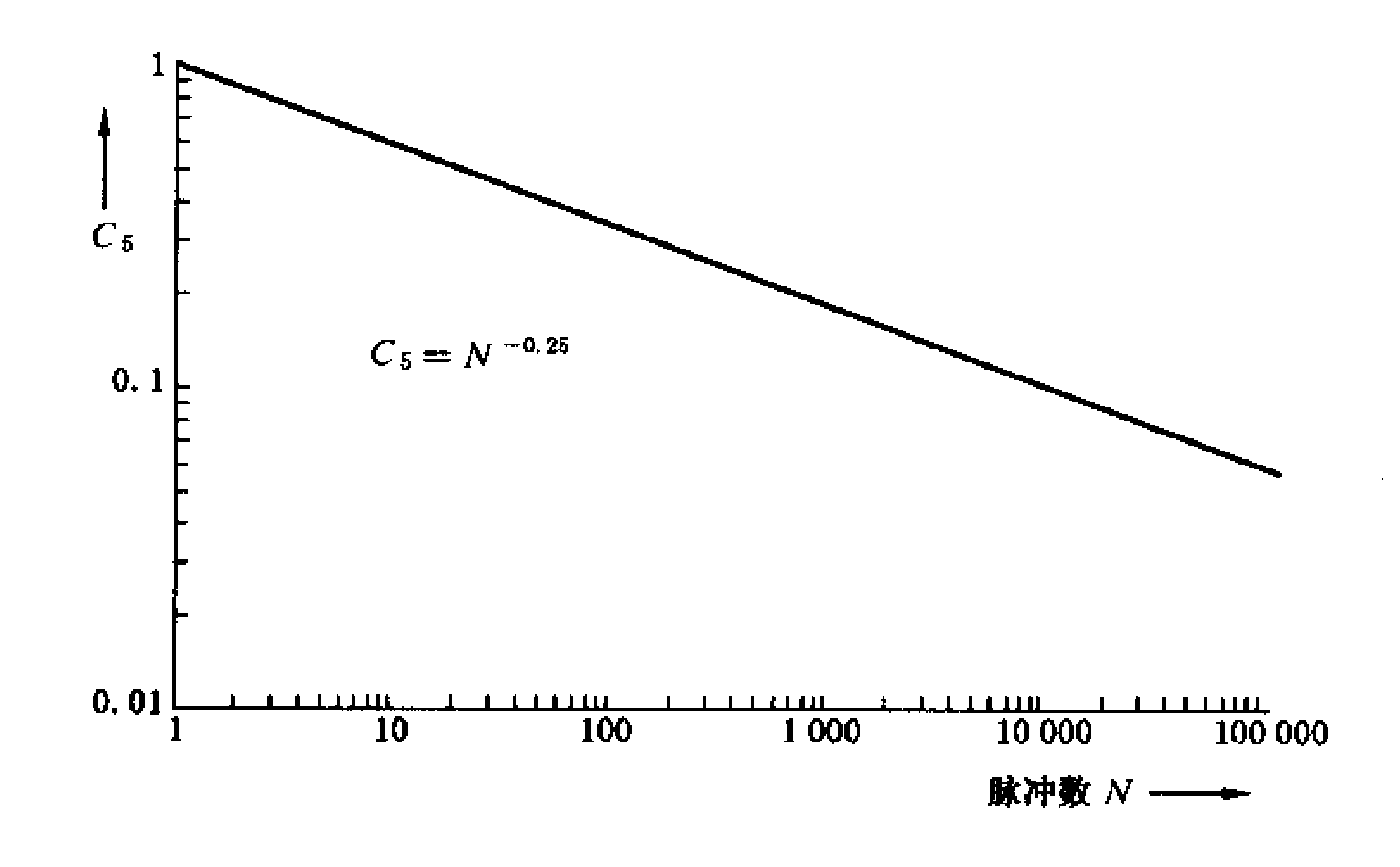


图 7　N(脉冲数)在 1～100 000 之间的修正因子 C_5

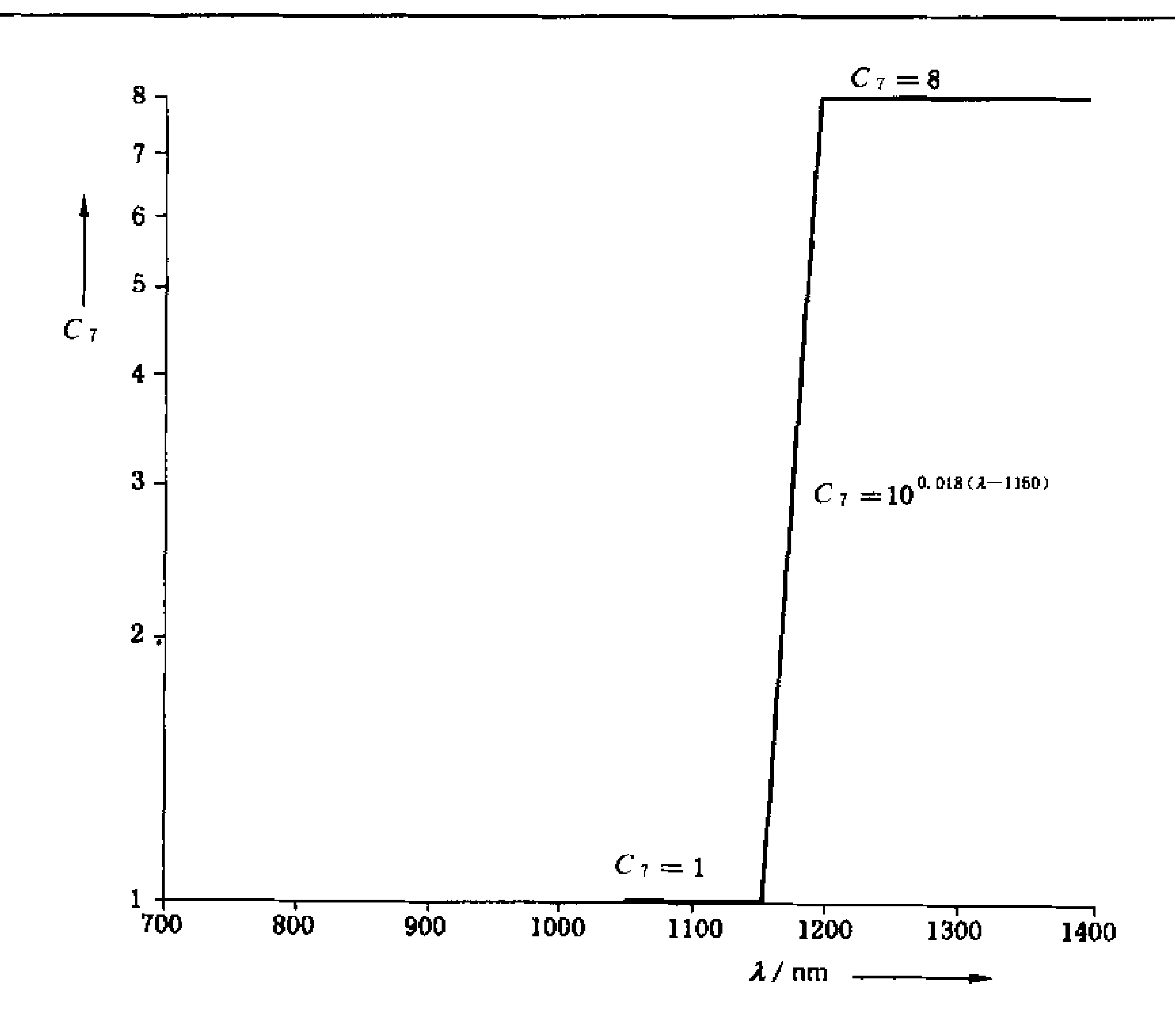


图 8　波长 λ=1 050 nm～1 400 nm 的修正因子 C_7

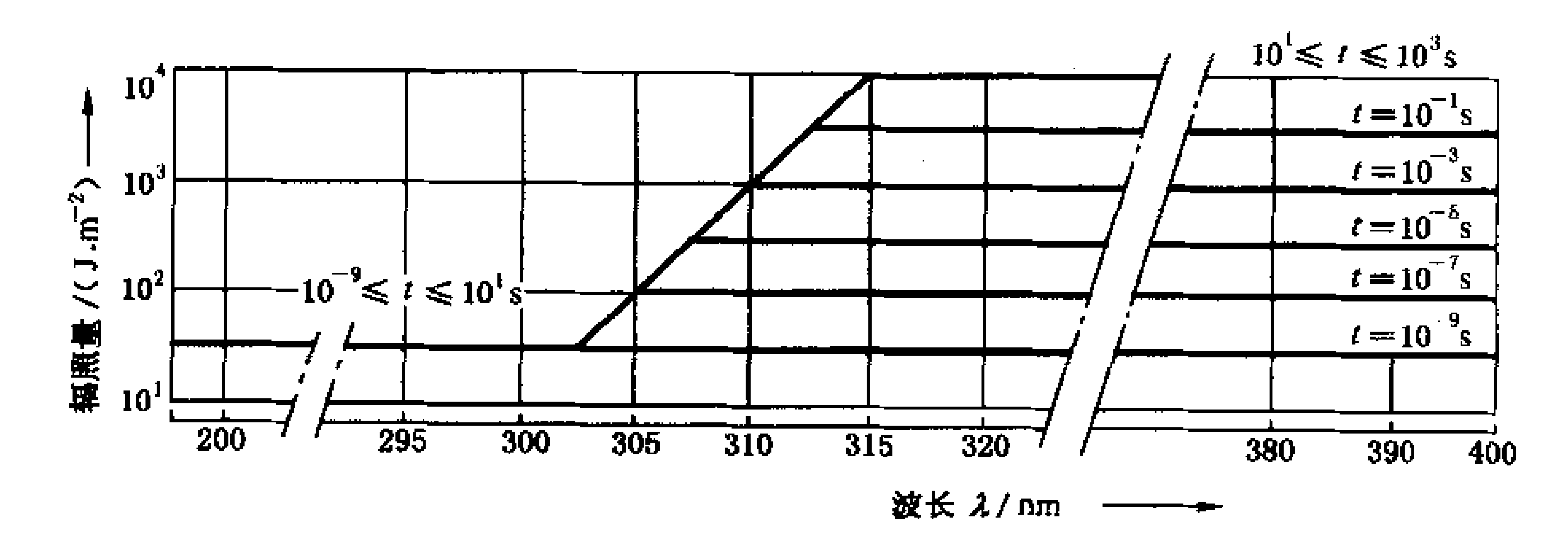


图 9a　对选定发射时间 10^{-9} s～10^3 s 的紫外辐射直接对眼照射的 *MPE* 值

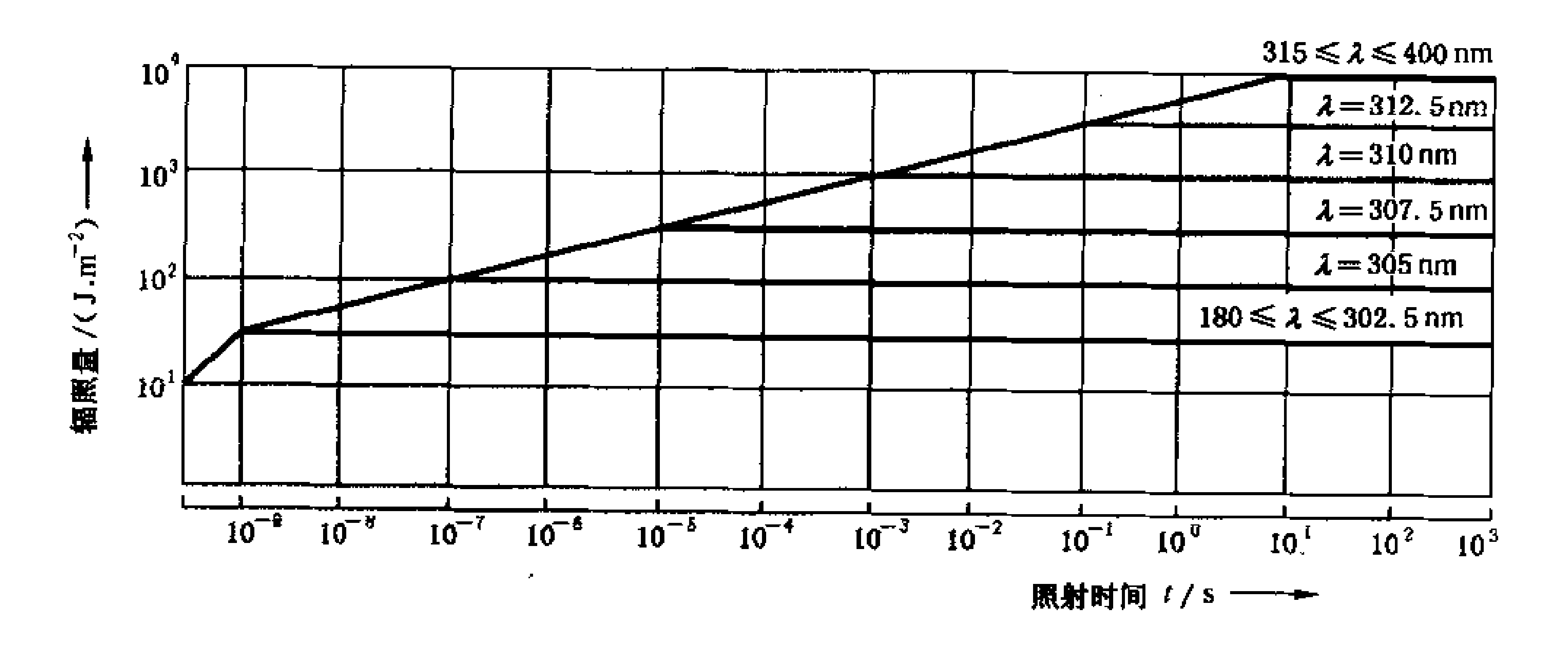


图 9b　对指定波长，照射时间为 10^{-9} s～10^3 s 的紫外辐射直接对眼照射的 *MPE* 值

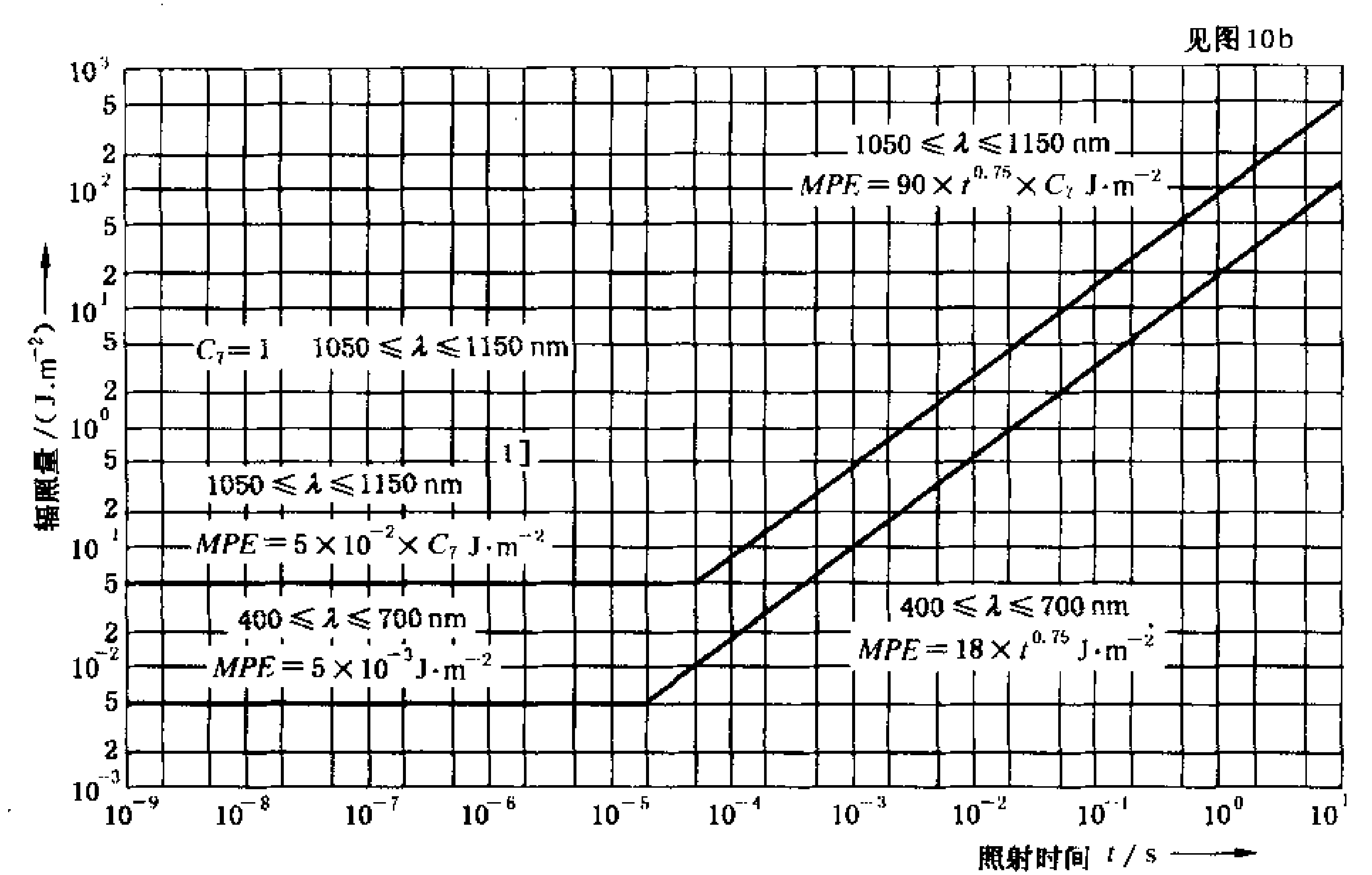


图 10a 对于单脉冲或单次照射，可见光(400 nm≤λ<700 nm)及选定的红外辐射(1 050 nm≤λ<1 150 nm)[1]的光束内视对眼照射的 *MPE* 值(C_6=1)

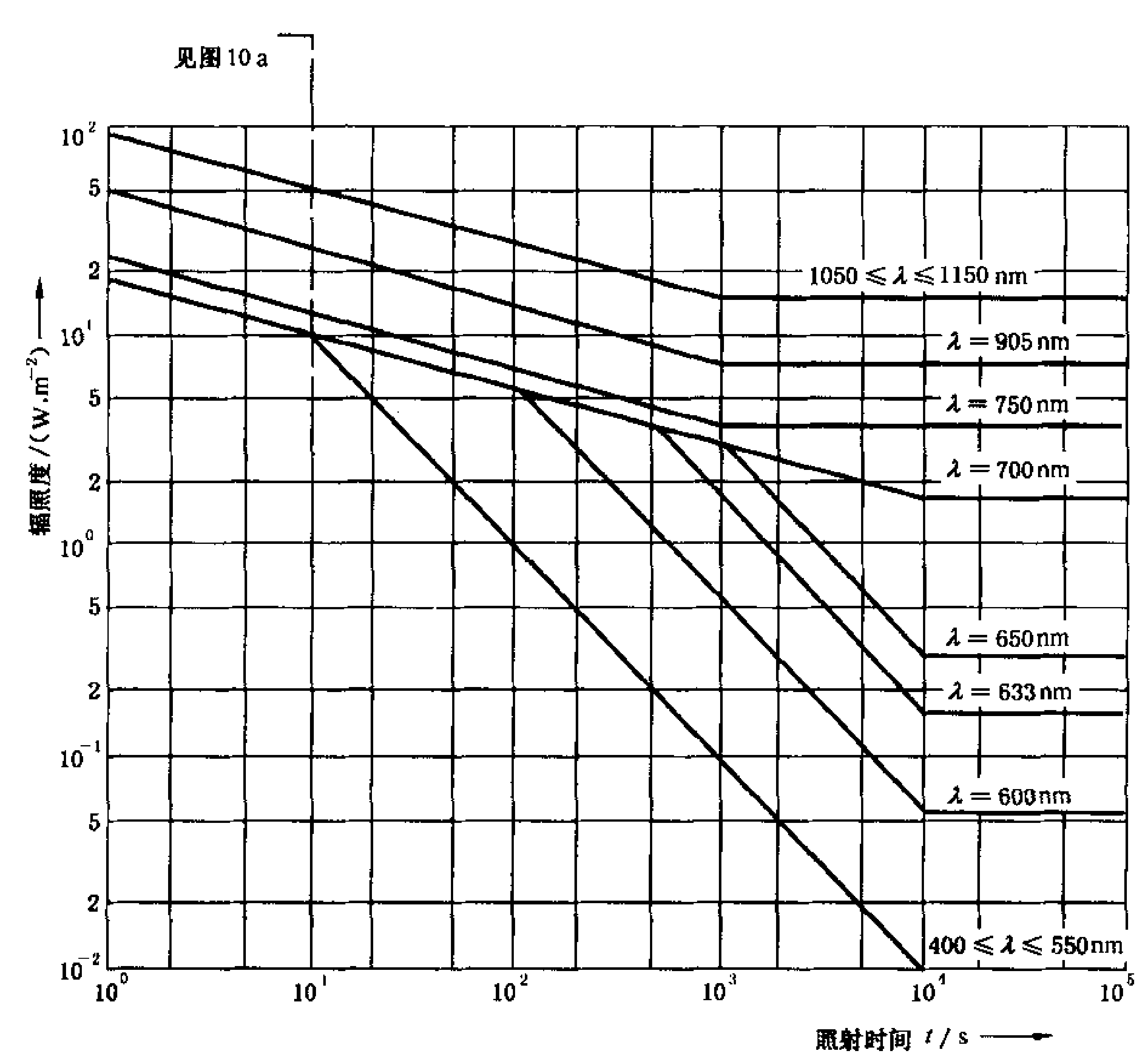


图 10b 对 400 nm～1 150 nm 的选定波长，照射时间大于 1 s 时，直接对眼照射(C_6=1)的 *MPE* 值

采用说明：

1] 原文有误，原文为 1 050≤1 150 nm，应为 1 050≤λ≤1 150 nm。

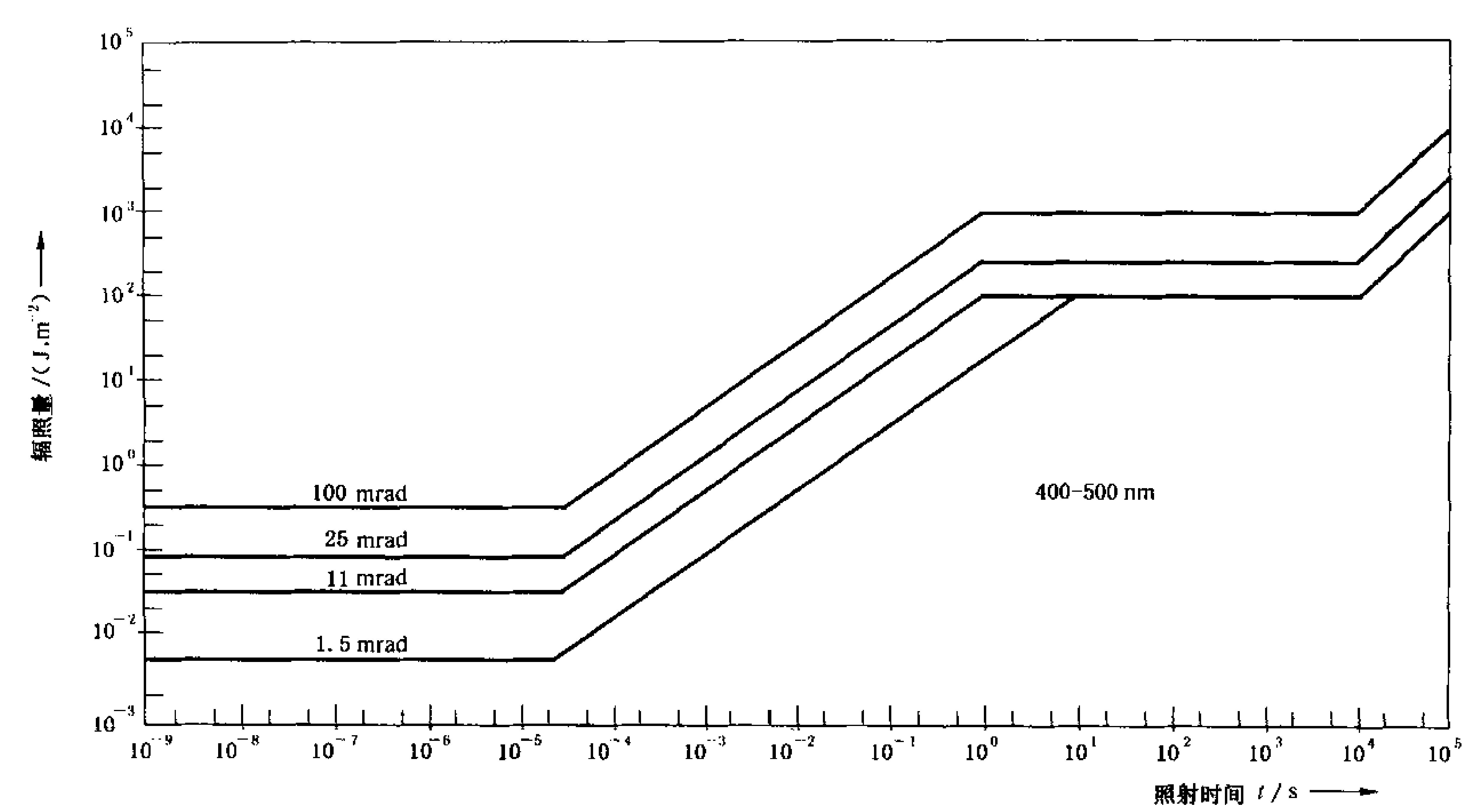


图 11　在选定的光源对向角内，对于单脉冲和连续波辐射对眼照射(λ=400 nm～550 nm)的 *MPE* 值

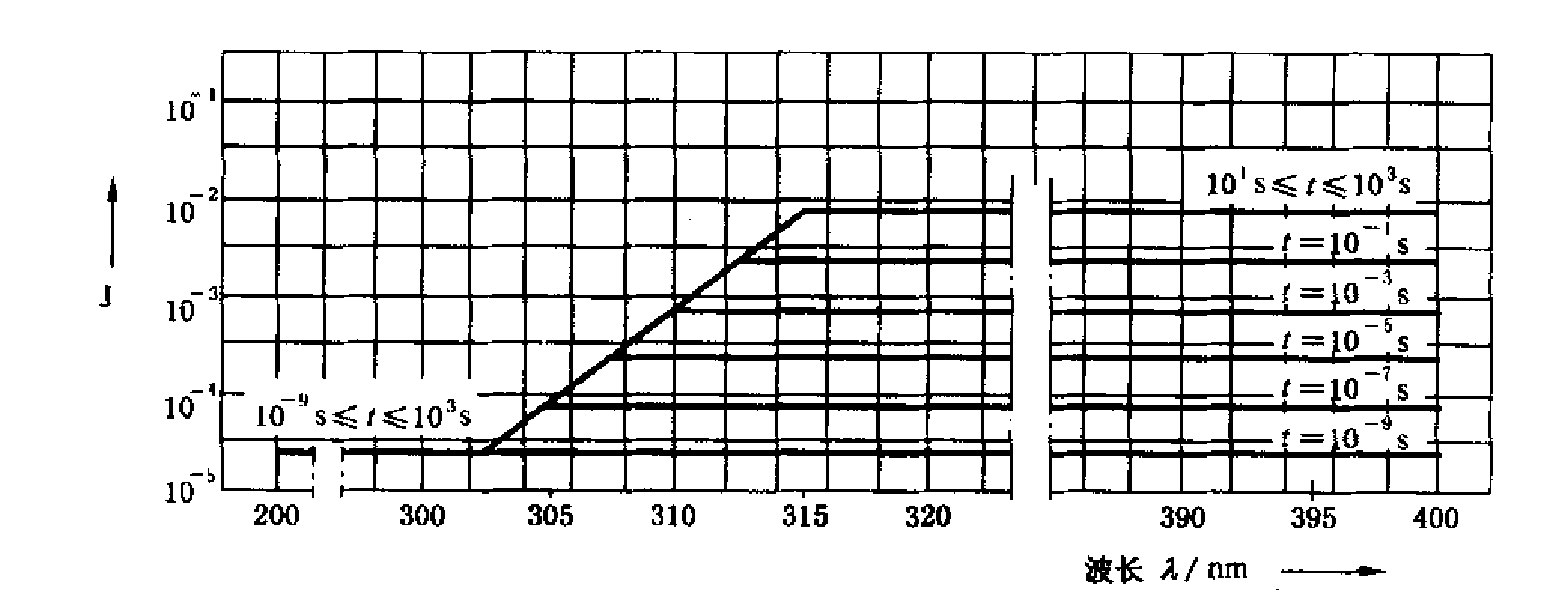


图 12a　对选定发射时间 10^{-9} s～10^{3} s 的 1 类紫外激光产品的 *AEL* 值

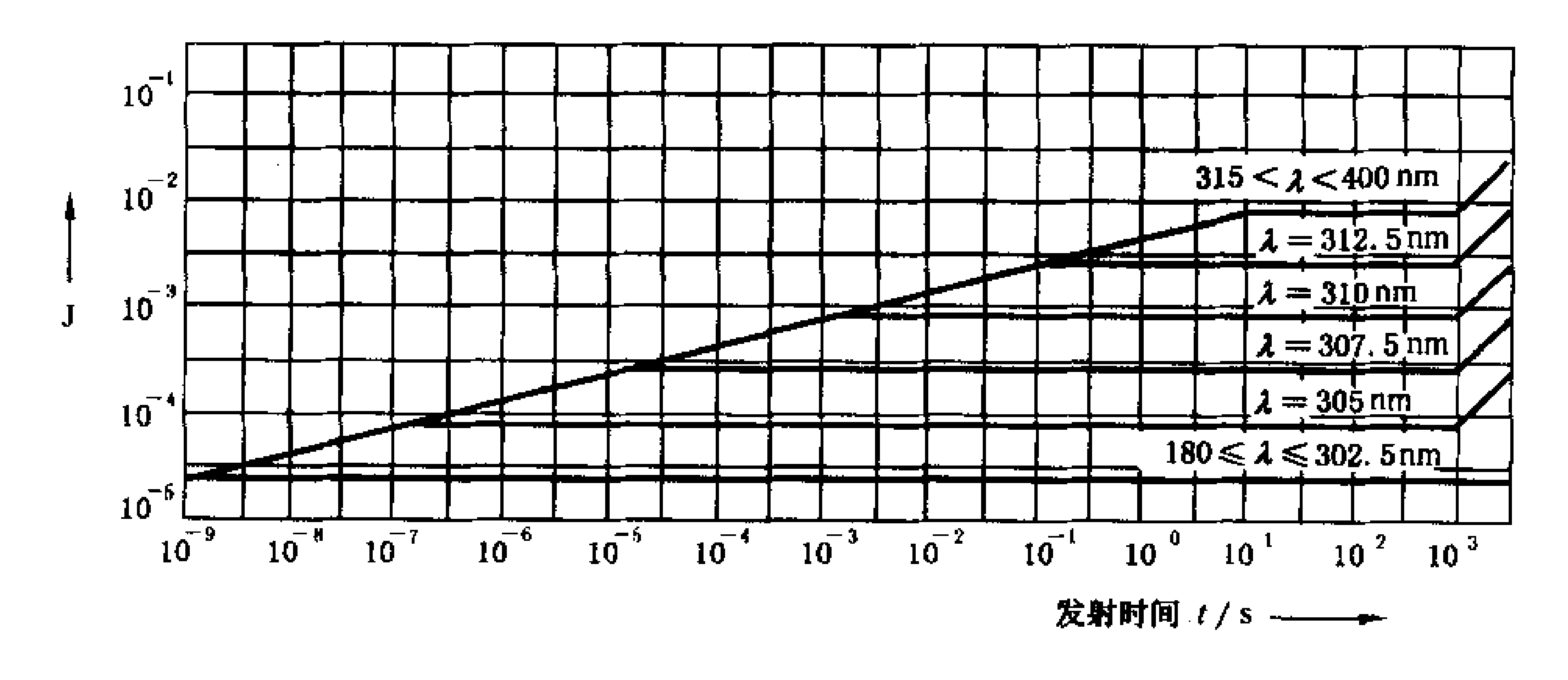


图 12b　在指定波长上，发射时间 10^{-9} s～10^{3} s 的 1 类紫外激光产品的 *AEL* 值

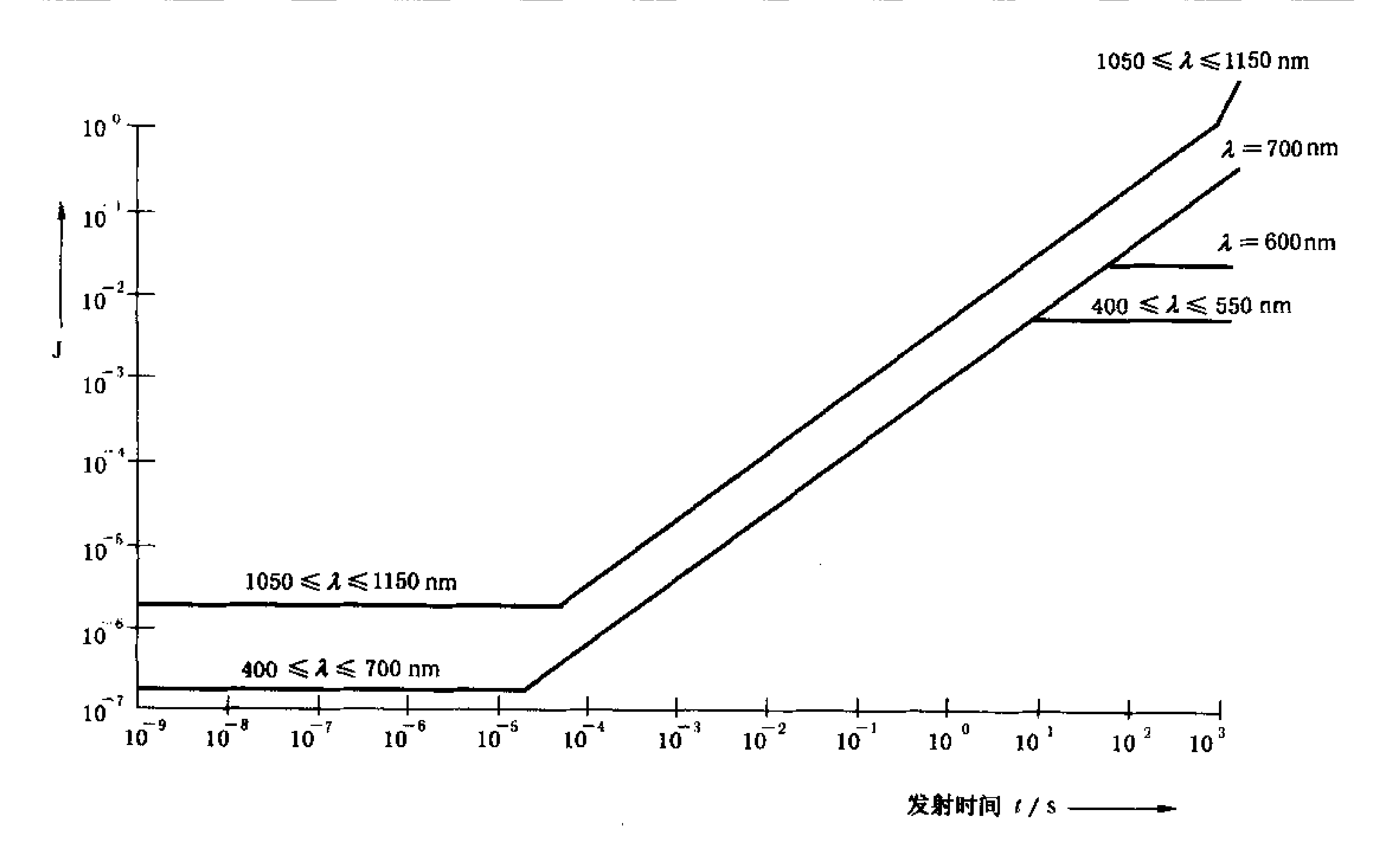


图 13 1类可见和指定红外激光产品的 AEL 值($C_6=1$)

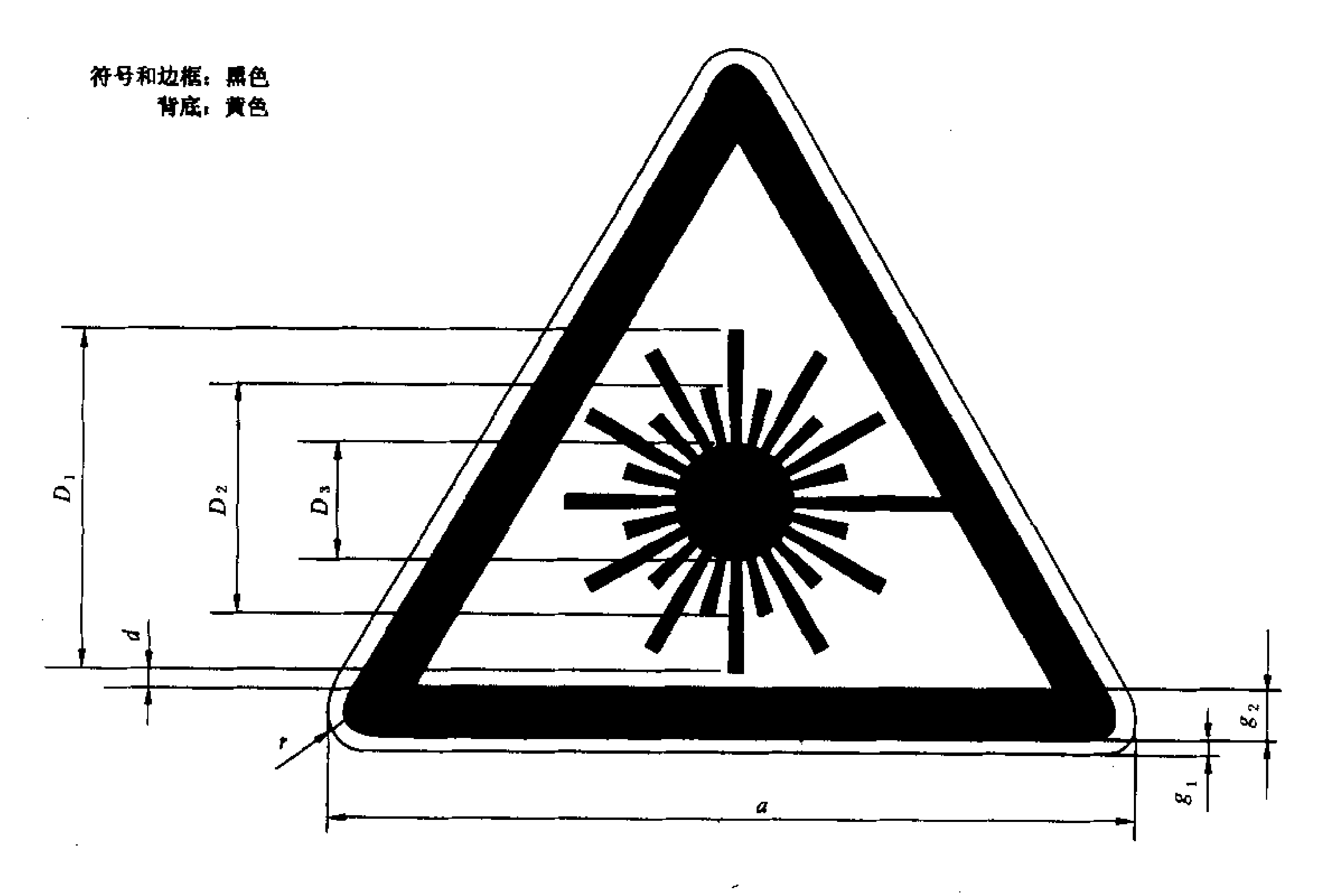


图 14 警告标记——危险符号

mm

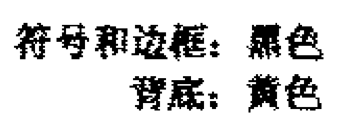
a	g_1	g_2	r	D_1	D_2	D_3	d
25	0.5	1.5	1.25	10.5	7	3.5	0.5
50	1	3	2.5	21	14	7	1
100	2	6	5	42	28	14	2
150	3	9	7.5	63	42	21	3
200	4	12	10	84	56	28	4
400	8	24	20	168	112	56	8
600	12	36	30	252	168	84	12
尺寸 D_1、D_2、D_3、g_1 和 d 都是推荐值。							

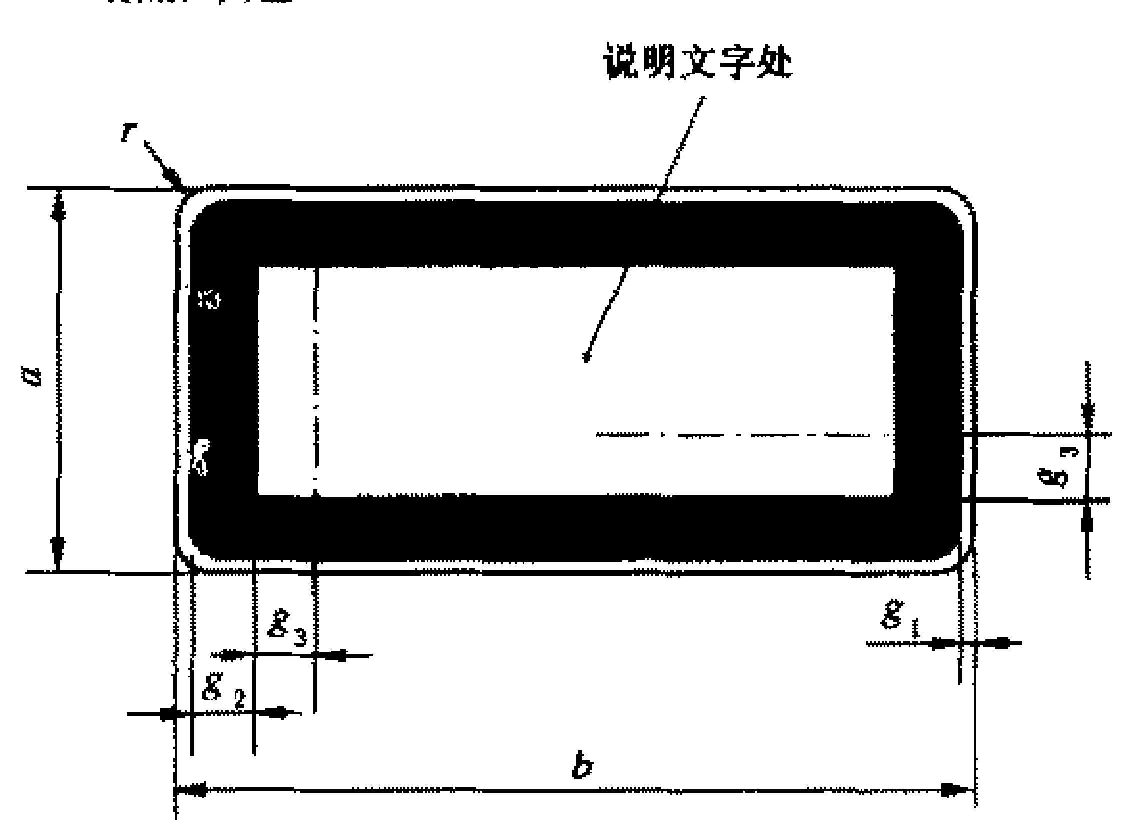
注

1 能够理解标记的最大距离 L 与标记最小面积 A 之间的关系由公式给出：$A=L^2/2\,000$，式中 A 和 L 分别用平方米和米表示。这个公式适用于 L 小于 50 m 的情况。

2 这些尺寸都是推荐值。只要与这些推荐值成比例，符号和边界清晰易读，并与激光产品要求的尺寸相符合。

图 14(完)





mm

$a \times b$	g_1	g_2	g_3	r	文字的最小字号
26×52	1	4	4	2	文字最小字号的大小必须能复制清楚
52×105	1.6	5	5	3.2	
74×148	2	6	7.5	4	
100×250	2.5	8	12.5	5	
140×200	2.5	19	10	5	
140×250	2.5	10	12.5	5	
140×400	3	10	20	6	
200×250	3	12	12.5	6	
200×400	3	12	20	6	
250×400	4	15	25	8	
尺寸 g_1 是推荐值。					

注

1 能够理解标记的最大距离 L 与标记的最小所示面积 A 之间的关系由公式给出：$A=L^2/2\,000$。A 和 L 分别是平方米和米。这个公式适用于 L 小于 50 m 的情况。

2 这些尺寸都是推荐值。只要标记能包含要求的文字和边缘，那么可以是任何需要的尺寸。g_2 和 g_3 的尺寸应该是标记较短边长的 0.06 倍。

图 15 说明标记

附 录 A
（提示的附录）
计 算 举 例

本附录中的例子所用的符号：

符号	单位	定义
a	m	发射激光束的直径。
AEL	W，J，$W \cdot m^{-2}$ 或 $J \cdot m^{-2}$	可达发射极限。
α	rad	扩展源所张的视角。
α_f	rad	在 $r_f=100$ mm 距离处眼睛对着表观辐射光源的张角。
α_{min}	rad	判定扩展光源的光源的最小对向角。
α_{max}	rad	表观光源对向角的值，当对向角高于该值时，其 MPE 和 AEL 不依赖光源的尺寸。（$\alpha_{max}=0.1$ rad）
C_1，C_2，…，C_7	1	修正因子（见“表 1～表 4 的注”）。
d_u	m	在距表观光源 r 处，包含总激光功率（或能量）u%的表观光源的最小圆环直径。对于高斯光束，d_{63}对应辐照度（或辐照量）降到其中心峰值 1/e 的各点所对应的直径。
D_e	m	光学系统的出射光瞳的直径。
D_o	m	光学系统的物镜直径。
η	1	从距表观光源规定距离 r 处的规定孔径收集到的全部激光功率（或能量）的百分数。
F	Hz	脉冲重复率。
G	1	有光学辅助眼和无光学辅助眼接收的视网膜辐照度或辐照量之比的平方根。
H	$J \cdot m^{-2}$	距表观光源规定距离 r 处的辐照量。
E	$W \cdot m^{-2}$	距表观光源规定距离 r 处的辐照度。
H_o	$J \cdot m^{-2}$	距表观光源规定距离为 0 处的出射辐照量。
E_o	$W \cdot m^{-2}$	距表观光源规定距离为 0 处的出射辐照度。
L_p	$J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	扩展源的总辐亮度。
λ	nm	激光辐射的波长。
M	1	光学仪器的放大率。
H_{MPE}	$J \cdot m^{-2}$	最大允许辐照量。
E_{MPE}	$W \cdot m^{-2}$	最大允许辐照度。
μ	m^{-1}	对特定波长的大气衰减系数。
N	1	规定时间间隔内的脉冲数。
NA	1	激光源的数值孔径。
NA_m	1	显微物镜的数值孔径。
$NOHD$	m	标称眼危害距离。
OD	1	光（透射）密度，定义为透射比的倒数以 10 为底的对数（符号 D 在此不用，以免与直径相混淆）。

P_o	W	连续激光器的总辐射功率(辐射通量)或重复脉冲激光器的平均辐射功率。
P_p	W	脉冲激光器在单脉冲内的辐射功率。
Φ	rad	出射激光束的发散角。
π	1	常数 3.142。
Q	J	脉冲激光器的总辐射能量。
r	m	从表观光源到观察者、测量孔径或漫射靶标的距离。
r_1	m	从激光靶标到观察者或测量孔径的距离。
$r_{1,max}$	m	在扩展源观察条件下,从激光靶标到观察者的最大距离。
t	s	单激光脉冲的持续时间。
T	s	脉冲串的总照射时间。
T_1,T_2	s	时间转效点(见表1～表4的注)。
w_o	μm	光缆光功率分布的 $1/e^2$ 处测得的单模模场直径。

A1 最大允许照射量(*MPE*)——介绍

最大允许照射量在3.51定义为人体活组织经照射立即或在稍后不引起重大伤害的激光辐射最大值。最大允许照射量的值要低于已知的危害水平。然而,*MPE* 应当视为安全照射的控制值,而不能作为安全照射值和非安全照射值的准确分界线。

MPE 依赖下列因素:

——辐射波长;

——照射时间或脉冲持续时间;

——一种以上波长照射组织时的光谱;

——受照射组织的特性;

——在波长 400 nm～1 400 nm 的范围内,光源的对向角(决定视网膜像的尺寸)。

本附录给出的实例阐述了光束内视、漫反射和扩展源、脉冲或调制照射的计算过程。这些例子逐步地展示了对典型波长和其他照射参数的计算步骤。当需要计算 *MPE* 时,用户可针对特定情况运用这些步骤。

A2 最大允许照射量(*MPE*)——光束内视

当光束引起最小的视网膜影像时出现光束内视。下列三个例子说明光束内视的计算步骤。

例 A2-1:

一台氦-镉激光器 λ=325 nm,发射持续时间为 0.1 s,计算 *MPE*。

解答:

可在表6查到 *MPE*。在波长范围 315 nm～400 nm 和照射时间栏 1×10^{-3} s～10 s 的交叉点查到的 *MPE* 等于 C_1 J·m^{-2}。C_1 可由表1～表4的注所给出的公式计算。

$$C_1 = 5.6\times10^3\times t^{0.25}$$

$$H_{MPE} = 5.6\times10^3\times0.1^{0.25}\ \mathrm{J\cdot m^{-2}} = 3.15\times10^3\ \mathrm{J\cdot m^{-2}}$$

除以时间 t 即得到辐照度:

$$E_{MPE} = 3.15\times10^4\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}$$

例 A2-2:

确定一台脉冲红宝石激光器单脉冲最大允许辐照量,λ=694 nm,照射时间为 10^{-3} s。

解答:

在表6中,在波长范围 550 nm～700 nm 和照射时间 $t=5\times10^{-5}$ s～10^{-3} s 的交叉点查找 *MPE*,

MPE 为：

$$H_{MPE} = 18 \times t^{0.75} \times C_6\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}$$

对光束内视，$\alpha < \alpha_{min}$，且 $C_6 = 1$。

这样，

$$H_{MPE} = 18 \times (10^{-3})^{0.75} \times 1\ \mathrm{J \cdot m^{-2}} = 0.10\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}$$

例 A2-3

一台砷化镓激光器，$\lambda = 905$ nm，脉冲宽度为 100 ns 时，*MPE* 是多少？

解答：

在表 6 中，在波长范围 700 nm～1 050 nm 和照射时间 $t = 10^{-7}$ s～1.8×10^{-5} s 的交叉处查找 *MPE*，用辐照量表述的 *MPE* 为：

$$H_{MPE} = 5 \times 10^{-3} \times C_4 \times C_6\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}$$

系数 C_4 可从表 1～表 4 的注给出的公式中计算出：

$$C_4 = 10^{0.002(\lambda - 700)} = 2.57$$

由于 $C_6 = 1$（点光源的情况下）

$$H_{MPE} = 5 \times (10^{-3}) \times 2.57 \times 1\ \mathrm{J \cdot m^{-2}} = 12.9 \times 10^{-3}\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}$$

例 A2-4　复合激光二极管阵列源：

在一个复合(Ga-As，905 nm)激光二极管阵列源前 1 m 距离处、照射时间 10 s，求出适用于光束内视的 *MPE*。该阵列源是由安放在准直光学系统后的两行二极管(每行 10 只)。光源输出功率为 6 W、脉冲重复率为 12 kHz，脉冲宽度为 80 ns，发射口径(准直透镜)为直径 5 cm，出射光束的峰值 $1/e$ 辐照点的直径为 3.5 cm(即 3.5 cm 测量圆孔可收集 63%的光束功率)。在 1 m 的距离，轴向光束辐照度(平均值)是 $3.6 \times 10^3\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$。光束发散度平行方向 25 mrad，垂直方向 3 mrad，且在距出射窗孔 1 m 处，光束尺寸近似等于 3 cm×3.8 cm。

在距离出射窗孔外 1 m 处拍摄到的光束内视照片(使用红外底片)，展现出每个二极管对着一个投影线像，长 2.2 mrad，宽小于 0.5 mrad，每个二极管中心到中心间隔 3 mrad 的角，两行二极管间隔 2.3 mrad的角(见图 A1)，为了减少眩光，使用一个带有 *OD* 4 滤光片的红外变像器，它可显示出这些角在 10 cm～2 m 所有观察距离上是不变的(这种现象的解释见 Sliney and Wolbarsht 的《激光器和其他光源的安全》第 15 章，纽约：Plenum 出版公司，1980)。

解答：

用于激光二极管阵列的 *MPE* 是由评估每个独立光源和每个可能的二极管阵列组而得到的最严格的 *MPE*。然而，保守的假定所有辐射功率均从单个点光源发出，则评估能大大简化。这总是夸大危险，而且如果不产生过度限制性的控制措施，就不必进行扩展光源的更复杂分析。

由于必须计算单只二极管，两只相邻的二极管，三只或四只等为一组的二极管，以及整个阵列的 *MPE*，适合的(最严格的)*MPE* 的确定需要一种试验——误差的处理方法；认为每次功率或能量都在该组对应的张角 α 加以平均。绘出不同光源图有助于研究二极管的不同组合(见图 A1)。除组合情况外，两种情况采用的对向角是不同的，在重复脉冲校正因子 C_5 使单个脉冲的 *MPE* 减小的极限情况下，$\alpha_{min} =$ 1.5 mrad，而在脉冲串的 *MPE* 的极限情况下 $\alpha_{min} = 11$ mrad。10 s 照射的脉冲总数 N 是 120 000。

对多脉冲评估的单脉冲 *MPE* 由下式给出(使用表 6 中的 80 ns 脉冲)：

$$\begin{aligned} H_{MPE,列} &= C_5 \times 5 \times 10^{-3} C_4 C_6\ \mathrm{J \cdot m^{-2}} \\ &= 120\ 000^{-0.25} \times 5 \times 10^{-3} \times 2.57\ C_6\ \mathrm{J \cdot m^{-2}} \\ &= 6.9 \times 10^{-4}\ C_6\ \mathrm{J \cdot m^{-2}} \end{aligned}$$

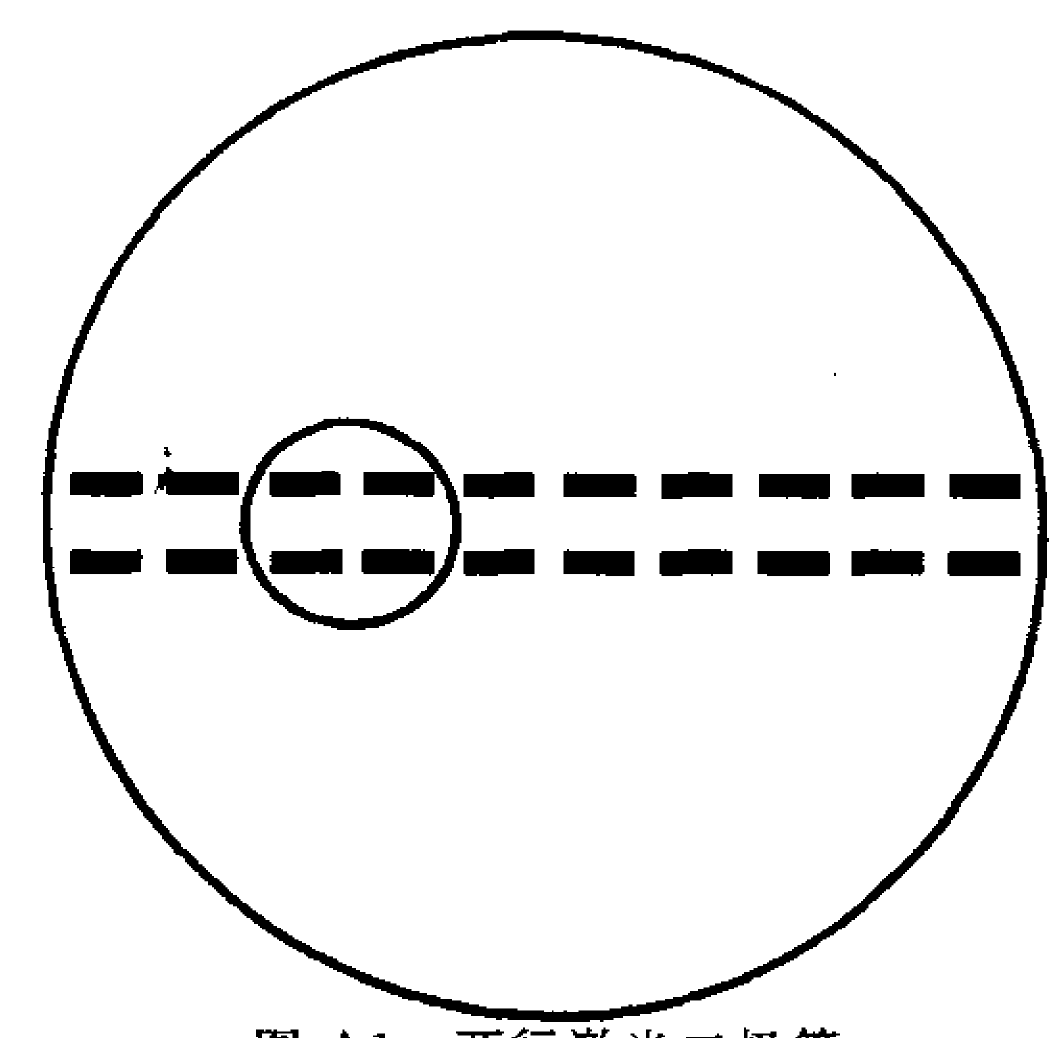


图 A1 两行激光二极管

为了用光束的平均辐照度比较单脉冲的 MPE，适宜于将上述 MPE（用辐照量表示）用每秒脉冲数 F 平均的辐照度表示如下：

$$E_{MPE,列,F} = H_{MPE,单} \times F$$
$$= 6.9 \times 10^{-4} C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \times 1.2 \times 10^4 \text{ Hz}$$
$$= 8.28 C_6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

平均功率评定的单脉冲 MPE 由下式给出（使用表 6 中的 10 s 照射）：

$$H_{MPE,平均} = 18 \times t^{0.75} C_4 C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$
$$= 18 \times 10^{0.75} \times 2.57 C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$
$$= 260 \times C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

上述 MPE 用辐照量表示，也可用 10 s 照射的平均值表示如下：

$$E_{MPE,平均} = H_{MPE,平均}/t$$
$$= 260 \times C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}/(10\ s)$$
$$= 26 \times C_6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

不用任何其他转换，$E_{MPE,平均}$就可以与光束的平均辐照度直接比较。

将两种不同评定给出的平均辐照度值进行比较是有益的，例如 $E_{MPE,单,F} = 8.28\ C_6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$和 $E_{MPE,平均} = 26 \times C_6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$，通过比较得出一个有趣的结果。当多脉冲评定的 C_6 值与平均功率评定的 C_6 值之比率小于 26/8.28＝3.14 时，多脉冲评定给出最严格的 MPE，因此，$E_{MPE,单,F}$用来计算危险系数。当比值大于 3.14 时，所用的值是 $E_{MPE,平均}$。

如果对向角 α 小于或等于 1.5 mrad，上述比值是 1，则所用的值是 $E_{MPE,单,F}$。如果对向角 α 大于 1.5 mrad 或小于 11 mrad，此比值是 α/(1.5 mrad)。在此情况下，如果二极管组的对向角 α 小于 3.14×1.5 mrad＝4.71 mrad，则所用的 MPE 是 $E_{MPE,单,F}$，反之，如果 α 大于 4.71 mrad，则所用的 MPE 是 $E_{MPE,平均,F}$。如果 α 大于或等于 11 mrad，此比值是 11/1.5＝7.33，则所用的 MPE 是 $E_{MPE,平均}$。

这些结论有助于简化这个例子的计算。然而，有必要对每个要评定的管组 $E_{MPE,单,F}$和 $E_{MPE,平均}$进行比较。

单二极管组

单二极管组的对向角为 0.5 mrad（垂直）和 2.2 mrad（水平）。矩形光源的 MPE 由两个对向角的算术平均值确定。如 13.4.2 所述，在确定平均值之前，任何一个小于 1.5 mrad 或大于 100 mrad 的对向角都应分别由 1.5 mrad 或 100 mrad 代替。因此平均值如下：

$$(1.5 + 2.2)/2 \text{ mrad} = 1.85 \text{ mrad}$$

因为这个数值小于 4.7 mrad，最严格 MPE 由多脉冲评定法确定。这个数值大于 1.5 mrad，因此单个二极管被认为是扩展光源，修正因子是 $C_6=1.85/1.5=1.23$。合适的 MPE 如下：

$$E_{MPE,二极管} = E_{MPE,单,F} = 8.28 \times 1.23\ W \cdot m^{-2} = 10.2\ W \cdot m^{-2}$$

此 MPE 不适用于总辐照度，但适用于单个二极管的辐照度。假定所有二极管均有相同的发射功率，单个二极管的 MPE 应为总辐照度除以二极管的数量，即 20。

$$E_{二极管} = E_{总}/20 = 3\,600/20\ W \cdot m^{-2} = 180\ W \cdot m^{-2}$$

此 MPE 在 1 m 距离处超过 180/10.2=17.6 倍的 MPE。

水平双二极管组

考虑一种可能的阵列组是两个水平相邻二极管对向角为 0.5 mrar(垂直)×5.2 mrad(水平)。按 13.4.2 所述，用 1.5 mrad 代替 0.5 mrad。两个对向角尺寸的算术平均值是(1.5+5.2)/2 mrad=3.35 mrad。最严格的 MPE 由多脉冲评定给出。修正因子是 $C_6=3.35/1.5=2.23$，合适的 MPE 如下：

$$E_{MPE,水平双二极管} = E_{MPE,单,F} = 8.28 \times 2.23\ W \cdot m^{-2} = 18.5\ W \cdot m^{-2}$$

由于这组的辐照度是单二极管辐照度的两倍，因此，该 MPE 必须与下述值相比较：

$$E_{双} = E_{二极管} \times 2 = 180 \times 2\ W \cdot m^{-2} = 360\ W \cdot m^{-2}$$

在 1 m 距离处，危险系数是 360/18.5=19.5。因此，该双二极管组产生的危险系数大于单二极管组(即一个更保守的 MPE)。

垂直双二极管组

考虑对向角为 2.8 mrad(垂直)×2.2 mrad(水平)的两个垂直二极管阵列子单元。两个对向角尺寸的算术平均值是 2.5 mrad。最严格的 MPE 由多脉冲评定给出。修正因子是 $C_6=2.5/1.5=1.67$，合适的 MPE 如下：

$$E_{MPE,垂直双二极管} = E_{MPE,单,F} = 8.28 \times 1.67\ W \cdot m^{-2} = 13.8\ W \cdot m^{-2}$$

由于这组的辐照度是单二极管辐照度的两倍，因此，该 MPE 必须与下述值相比较：

$$E_{双} = E_{二极管} \times 2 = 180 \times 2\ W \cdot m^{-2} = 360\ W \cdot m^{-2}$$

在 1 m 距离处，危险系数是 360/13.8=26.1。因此，该组合产生的危险系数大于上一种组合。

4 二级管组

该阵列要考虑的另一种看似合理的子单元是对向角为 2.8 mrad(垂直)×5.2 mrad(水平)的 4 只相邻二极管。两个对向角尺寸的算术平均值是 4 mrad。最严格的 MPE 由多脉冲评定给出。修正因子是 $C_6=4/1.5=2.67$，合适的 MPE 如下：

$$E_{MPE,4} = E_{MPE,单,F} = 8.28 \times 2.67\ W \cdot m^{-2} = 22.1\ W \cdot m^{-2}$$

由于该组合的辐照度是单二极管辐照度的四倍，因此，MPE 必须与下述值相比较：

$$E_4 = E_{二极管} \times 4 = 180 \times 4\ W \cdot m^{-2} = 720\ W \cdot m^{-2}$$

在 1 m 距离处，危险系数是 720/22.1=32.5。因此，该组合产生的危险系数大于所有上述值。

一行 10 二极管

评定的另一种有趣的组合是一列对向角为 0.5 mrad(垂直)和 29.5 mrad(水平)的 10 只二极管。如 13.4.2 所述用 1.5 mrad 替代 0.5 mrad，两个对向角尺寸的算术平均值是(1.5+29.2)/2 mrad=15.3 mrad。在这种情况下，最严格的 MPE 由平均功率评定给出。因此，修正因子是 $C_6=15.3/11=1.39$，合适的 MPE 如下：

$$E_{MPE,10} = E_{MPE,平均} = 26 \times 1.39\ W \cdot m^{-2} = 36.1\ W \cdot m^{-2}$$

由于该组合含有 10 只二极管，因此，该 MPE 必须与下述值相比较：

$$E_{10} = E_{二极管} \times 10 = 180 \times 10\ W \cdot m^{-2} = 1\,800\ W \cdot m^{-2}$$

在 1 m 距离处，危险系数是 1 800/36.1=49.9。

20 二极管组

在这个例子中，要考虑的最后一种组合是评定20只二极管的整个阵列。由于这些二极管排成两行相邻二极管，垂直对向角等同于4只二极管组的垂直对向角，即2.8 mrad，水平对向角为29.2 mrad。平均值是16 mrad，最严格的*MPE*由平均功率评定给出。修正因子是$C_6=16/11=1.45$，合适的*MPE*如下：

$$M_{MPE,20}=E_{MPE,平均}=26\times1.45\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}=37.7\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}$$

该*MPE*必须与总辐照度比较。在1 m距离处，危险系数是3600/37.7=95.5。在这个例子中，这是最大的危险系数。

可以通过计算指出，诸如3只水平相邻二极管、6只相邻二极管(2×3)等其他二极管组，均给出小于95.5的危险系数，因此，用于评定该阵列危险程度的危险系数是95.5。

附加说明

需要指出，在其他场合，极限情况可能来自光源一部分的组合，而不是整个光源。例如，我们考虑20只二极管的另一种阵列结构，每10只二极管排成一行，共2行，二极管角尺寸和垂直距离与上述例子相同，但中心到中心的水平距离为6 mrad。

在这一新情况下，整个阵列所用的对向角为(2.8+56.2)/2 mrad=29.5 mrad，这样，由平均功率评定给出最严格的*MPE*。因此，修正因子是$C_6=29.5/11=2.68$，合适的*MPE*如下：

$$E_{MPE,20}=E_{MPE,平均}=26\times2.68\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}=69.7\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}$$

整个阵列的危险系数是3600/69.7=51.6。

可由计算表明8只相邻的二极管组合(2×4)给出的最大危险系数。这组的对向角是(2.8+20.2)/2 mrad=11.5 mrad。这样，修正因子是$C_6=11.5/11=1.05$，因此，合适的*MPE*如下：

$$E_{MPE,8}=E_{MPE,平均}=26\times1.05\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}=27.3\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}$$

这个值应与下述值相比较：

$$E_8=E_{二极管}\times8=180\times8\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}=1\,440\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}$$

这个组合的危险系数是1440/27.3=52.7。由于52.7是最大值，故认为它是这个阵列的危险系数。

整个阵列给出的危险系数比8只二极管组的危险系数小，这一事实并不意味整个阵列即20只二极管的组合其危险小于8只二极管组的组合。明显奇怪结果的意义在于，在这一特定情况下，把20只二极管作为一个29.5 mrad对向角的均匀光源不能正确评定其危险，这是由于整个光源并非均匀造成的，而通过对组成阵列自身部分的分析就能正确评定。

所需的光密度

为了保护1 m距离处的观察者，需要用一个衰减因子为99.5或近似100的防护滤光片。光密度为2(即：$\log_{10}100$)相当于衰减因子为100的滤光片能在距激光器1 m距离处提供充分的保护。

一般情况下，尽管滤光片有足够的光密度，由于辐射可对其损坏而丧失防护能力，因而确定滤光片所能承受的辐射功率水平也是必要的。

用点光源近似的简化处理代替二极管组计算，整个阵列的*MPE*等于8.28 W·m^{-2}。这样，在1 m的距离，点光源近似导致辐照度超过*MPE*的3600/8.28=435倍，所需光密度为$\log_{10}435=2.64$或更高。注意点光源近似法导致其估算的危险高于用更准确二极管组合近似法得出的危险的四倍。

光学装置的使用

普通的望远镜和双目镜不能将物体在1 m的距离上聚焦。然而，这个示例目的是考虑用3×放大率器件观察1 m处的激光器。这要求增加下列分析。

这个装置的孔径为21 mm，小于光束的尺寸。因此，放大率按$3^2=9$倍数增加。由于3×装置的放大率，阵列的角尺寸按系数3增加。因此，必须进行前述那样的计算，且要考虑新的角尺寸值和每个组合的放大率。

由于测量方法要求以$\alpha_{max}=100$ mrad的最大接收角收集辐射(见8.2中的j))，当这个组合的两个角尺寸之一，如水平的一个(用$\alpha_{水平}$表示)大于α_{max}时，这一组合的放大率减小到因子$\alpha_{max}/\alpha_{水平}$以排除接

收角以外的光源部分。此外，如 13.4.2 所述，在确定算术平均值之前用以计算的 C_6，任何对向角应被限制到 α_{max}。然而，在这个特殊的例子中，所有对向角均小于 α_{max}。

考虑到用该光学装置辅助观察的情况，对不同二极管组的分析表明 20 只二极管的整个阵列组合给出危险系数的最大值。这个值是 286，要求 log286＝2.46 的附加光密度。

应该注意另一种情况，当光源均匀，光束直径大于 3×放大光学装置的孔径，且有镜和无镜观察每组(含整个阵列)的对向角在 α_{min}和 α_{max}之间时，评定简便一些。事实上，在这种情况下，光学装置收集到九倍的放大率，而光源看上去为原来的三倍大。然而，由于系数 C_6 大三倍，光学器件产生的危险应当是无镜观察危险的三倍。

在这种特定情况下，即光源不均匀，其危险系数大约是无镜观察危险系数的三倍。然而，在其他情况下，其结果可能大不相同。

普通双目镜在该波长透射约 70%，附加光密度为 0.15。然而，3×放大光学装置的必要光密度是 OD＝2.46－0.15＝2.31。这样，2.31 或更高的光密度为距出射孔 1 m 的距离处有镜和无镜直接光束内视观察提供保护。

多脉冲重复率的考虑

为了简化多脉冲照射的评定，在确定适当 MPE 时，应注意考虑脉冲重复频率的限值。频率低于限值时，最严格的 MPE 由多脉冲评定给出；频率高于限值时，最严格的 MPE 由平均功率评定给出。

这个限值依赖于三个参数：波长、脉宽和照射时间。不过，对于这些参数的某些范围这个限值是一个常数，为便于使用，这些结果概括如下：

a) 波长在 400 nm～550 nm 之间，当脉宽在 10^{-9} s～1.8×10^{-5} s 范围内，且照射时间在 1.8×10^{-5} s～10 s 范围内时，频率限值 55 174 Hz。

b) 波长在 550 nm～700 nm 之间，脉宽在 10^{-9} s～1.8×10^{-5} s 范围内，且照射时间在 1.8×10^{-5} s～T_2(见表 1～表 4 的注)范围内时，频率限值 55 174 Hz。

c) 波长在 700 nm～1 050 nm 之间，脉宽在 10^{-9} s～1.8×10^{-5} s 范围内，且照射时间在 1.8×10^{-5} s～10^3 s 范围内时，频率限值 55 174 Hz。

d) 波长在 1 050 nm～1 400 nm 之间，脉宽在 10^{-9} s～5×10^{-5} s 范围内，且照射时间在 5×10^{-5} s～10^3 s 范围内时，频率限值 21 896 Hz。

然而，重要的是注意到只有当用多脉冲评定计算的 C_6 与用平均功率评定计算的 C_6 相等时这个频率限值才有效。因此，照射时间长于 0.7 s 时(见 9.3 中的 d))，只有当对向角不大于 1.5 mrad 时，上述频率的两个值才正确有效。

频率的这些值由 $H_{MPE,单}$和 $H_{MPE,平均}$比较并考虑到 $N=F\times t$ 获得的。例如，由下列比较获得 55 174 Hz 这一值：

$$5\times10^{-3}(F\times t)^{-1/4}\leqslant 18\,t^{0.75}/(F\times t)$$

$$5\times10^{-3}F^{3/4}\leqslant 18$$

这就给出了上述值。

A3 最大允许照射量(MPE)——漫反射和扩展光源

扩展源观察的例子为：

1) 从散射面反射的激光辐射(表观光源)。

2) 反射辐射在受照眼视网膜上形成像且大于视网膜成像的某个最小值，该值由极限对向角 α 确定。

极限对向角是照射时间的函数且从距表观光源不小于 100 mm 处测量(见 9.3 中的 d))。α_{min}的最大值可达 0.011 rad。

例 A3-1：

在理想的漫射器反射前，扩展一台调Q Nd—YAG激光器发射的辐射($\lambda=1\ 064$ nm，$t=10^{-8}$ s)以形成直径为2 cm的光束。

a）扩展光源观察条件存在的范围是什么？

b）距漫射器2.5 m处的MPE是多少？

解答：

由公式定义的对向角为：

$$\alpha = 2\arctan\frac{d_{63}}{2r_1} \approx \frac{d_{63}}{r_1}$$

式中：d_{63}——激光束在漫射目标处的直径。

a）在极限情况下，$\alpha=\alpha_{min}$，因此：

$$r_{1,max} = \frac{d_{63}}{\alpha_{min}}$$

对于这个例子：

$$r_{1,max} = \frac{0.02\ \text{m}}{1.5 \times 10^{-3}\ \text{rad}} = 13.3\ \text{m}$$

在大于$r_{1,max}=13$ m的距离，点光源观察的条件存在。

特定照射时间的MPE由下式给出(见表6)：

$$H_{MPE} = 5 \times 10^{-2} \times C_6 \times C_7 \quad \text{J} \cdot \text{m}^{-2}$$

式中：$\lambda=1\ 064$ nm时，$C_7=1$(见表1～表4的注)。对于点光源观察的情况，$\alpha\leqslant\alpha_{min}$，$C_6=1$，$MPE$为：

$$H_{MPE} = 5 \times 10^{-2} \times 1 \times 1\ \text{J} \cdot \text{m}^{-2} = 5 \times 10^{-2} \quad \text{J} \cdot \text{m}^{-2}$$

b）在小于$r_{1,max}=13$ m的距离，扩展源观察的条件存在，且$\alpha_{min}<\alpha\leqslant\alpha_{max}$时，$C_6=\alpha/\alpha_{min}$。在$r_1=2.5$ m距离处，

$$\alpha = \frac{d_{63}}{r_1} = \frac{0.020\ \text{m}}{2.5\ \text{m}} = 8 \times 10^{-3}\ \text{rad}$$

且

$$C_6 = \frac{\alpha}{\alpha_{min}} = \frac{8 \times 10^{-3}\ \text{rad}}{1.5 \times 10^{-3}\ \text{rad}} = 5.33$$

所以，距扩展源2.5 m处观察的MPE是：

$$H_{MPE} = 5 \times 10^{-2} \times 5.33 \times 1\ \text{J} \cdot \text{m}^{-2} = 0.27\ \text{J} \cdot \text{m}^{-2}$$

例A3-2：

求出例A3.1中从激光器输出的最大辐射能量，允许无危害观察从距观察者眼睛小于0.2 m的理想漫射器反射输出。

解答：

在距离小于0.2 m处，观察条件是接收角α大于$\alpha_{max}=0.1$ rad：

$$\alpha = \frac{d_{63}}{r_1} = \frac{0.020\ \text{m}}{0.20\ \text{m}} = 0.10\ \text{rad}$$

在本扩展源观察的条件下，能产生有害反射的入射光束辐照量，可借助将漫反射MPE先表示为总辐照度而得到。通过用辐照量表示的漫反射MPE除以最大接收角形成的立体角来完成。依据点光源的MPE用13.5的等式给出结果；因此系数等于辐照量MPE式中所用的修正值$C_6(\alpha=\alpha_{min})$。对于$t<0.7$ s的情况，用总辐亮度表示的漫反射的MPE为：

$$L_{MPE} = 8.5 \times 10^3 \times H_{MPE,点光源}\ \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

由替代例A3-2中获得点源的MPE得到这个问题中的总辐亮度MPE：

$$L_{MPE} = 8.5 \times 10^3 \times 5.0 \times 10^{-2}\ \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} = 425\ \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

漫反射的总辐亮度与靶标处入射光束的辐照量有关，表示式为：

$$H = \pi \times L_p$$

因此，该辐照量足以从反射比为100%的白色靶标产生有害反射：

$$H_{MPE} = \pi \times L_{MPE}\ \mathrm{J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}} = 1.34 \times 10^3\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}$$

最后，假定辐射能量均匀分布在靶标束斑的面积(A)内，则足以产生有害反射的辐射能量为：

$$Q_{MPE} = H_{MPE} \times A = H_{MPE} \times \pi/4 \times d_{63}^2$$
$$= 1.34 \times 10^3 \times \pi/4 \times 0.02^2\ \mathrm{J} = 0.42\ \mathrm{J}$$

例 A3-3：

如果例 A3-2 激光器的输出聚焦在屏幕上，计算理想漫射屏幕法线方向上的最小安全观察距离。

解答：

在这种情况下，从漫射郎伯(Lambertian)靶标焦点的半球外部反射辐射，因此，应用点光源观察条件。在距朗伯源距离 r 处，辐照量由下式给出：

$$H = \left(\frac{Q\cos\theta}{\pi r_1^2}\right)$$

式中：θ——相对于表面法线的观察角。

郎伯源的标称眼危害距离 r_{NOHD} 由点光源辐照量 MPE 按下式得出：

$$r_{\mathrm{NOHD}} = \left(\frac{Q\cos\theta}{\pi H_{MPE,点光源}}\right)^{1/2}$$

在前面的例子中获得的激光器输出的最大辐射能量为 0.42 J，且特定观察角是 $\theta = 0$ rad。假定靶标同样是理想漫反射，则最小安全观察距离是：

$$r_{\mathrm{NOHD}} = \sqrt{\frac{0.42\ \mathrm{J} \times \cos(0)}{\pi \times 0.05\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}}} = 1.6\ \mathrm{m}$$

A4 最大允许照射量(*MPE*)——重复脉冲系统

用于重复脉冲系统照射(或扫描激光系统照射)的规则在 13.3 中给出。

例 A4-1：

确定一台氩激光器($\lambda = 488$ nm)辐射直射眼睛的光束内视 MPE，这台激光器的工作频率为 $F_1 =$ 1 MHz，脉宽为 $t = 10^{-8}$ s。

解答：

由于激光器工作在可见光谱部分，照射时间为眨眼反应时间 $T = 0.25$ s 所限制，在这个时间的脉冲总数为：

$$N = T \times F = 0.25\ s \times 10^6\ \mathrm{Hz} = 2.5 \times 10^5$$

13.3 中含有必须考虑的三个准则，且最严格的情况用于这次计算中。由于光束从点光源发出，C_6 的值为 1。

由 13.3 中的 a)，从任何单脉冲的照射不应超过单脉冲的 MPE。这样，根据表 6 在 10^{-8} s 时间内的辐照量为：

$$H_{单} = 5 \times 10^{-3} \times C_6\ \mathrm{J \cdot m^{-2}} = 5 \times 10^{-3} \times 1\ \mathrm{J \cdot m^{-2}} = 5 \times 10^{-3}\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}$$

由 13.3 中的 b)，在长度为 T 的脉冲串中的平均辐照度不应超过单脉冲持续时间为 T 的 MPE。在 0.25 s 的持续时间内(整个照射时间)，表 6 限制辐照量到：

$$H_T = 18\, t^{0.75} C_6\ \mathrm{J \cdot m^{-2}} = 18 \times 0.25^{0.75} \times 1\ \mathrm{J \cdot m^{-2}} = 6.36\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}$$

由于在 0.25 s 的持续时间内的脉冲数为 $N = 2.5 \times 10^5$，根据平均辐照度准则，则单脉冲的辐照量为：

$$H_{单\text{-}平均} = \frac{H_T}{N} = \frac{6.36}{2.5 \times 10^5}\ \mathrm{J \cdot m^{-2}} = 2.55 \times 10^{-5}\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}$$

由13.3中的c)，重复脉冲准则规定单脉照射量必定减小$N^{-0.25}$倍。由于在0.25 s时间内有$N=2.5\times10^5$个脉冲，则在该判定条件下的辐照量为：

$$H_{\text{峰}}=H_{\text{单}}\times N^{-0.25}=5\times10^{-3}\times(2.5\times10^5)^{-0.25}\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}=2.24\times10^{-4}\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}$$

由于13.3中的b)的平均辐照度准则的极限是最严格的情况，该系统的单脉冲MPE是$2.55\times10^{-5}\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}$。$MPE$也可用辐照度表示为：

$$E_{MPE}=\frac{H_{\text{单},\text{平均}}}{t}=\frac{2.55\times10^{-5}\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}}{10^{-8}\ \text{s}}=2.55\times10^3\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$$

例A4-2：

确定从工作频率$F=20$ Hz，脉宽为$t=1$ ms的Nd:YAG激光器($\lambda=1\ 060$ nm)的辐射直射眼睛的光束内视的MPE。

解答：

由于激光器不工作在可见光谱部分，不能由眨眼反应提供保护。意外伤害照射时间的合理估计值为10 s。这个时间内的脉冲数为：

$$N=T\times F=10\ \text{s}\times20\ \text{Hz}=200$$

13.3中含有必须考虑的三条准则，且最严格的一种用于此计算中。由于光束从点光源发出，C_6的值为1。表1～表4的注中表明，波长为1060 nm的C_7值也为1。

由13.3中的a)，从任何单脉冲的照射不应超过单脉冲的MPE。这样，根据表6在1 ms时间周期内的辐照量为：

$$H_{\text{单}}=90\,t^{0.75}C_6C_7\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}=90\times0.001^{0.75}\times1\times1\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}=0.506\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}$$

由13.3中的b)，在脉冲序列长度T内的平均辐照度不应超过持续时间为T的单脉冲的MPE。在10 s持续时间(整个照射时间)，表6限制辐照量到：

$$H_T=90\,t^{0.75}C_6C_7\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}=90\times10^{0.75}\times1\times1\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}=506\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}$$

由于在10 s持续时间内的脉冲数为$N=200$，根据平均辐照度准则，则单脉冲的辐照量为：

$$H_{\text{单},\text{平均}}=\frac{H_T}{N}=\frac{506}{200}\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}=2.53\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}$$

由13.3中的c)，重复脉冲准则规定单脉辐射量需减小$N^{-0.25}$倍。因为10 s持续时间内$N=200$的脉冲，在该准则条件下辐照量为：

$$H_{\text{单}}=H_{\text{单}}\times N^{-0.25}=0.506\times(200)^{-0.25}\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}=0.135\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}$$

由于13.3中的c)的重复脉冲准则极限是最严格的，该系统的单脉冲MPE是$0.135\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}$。$MPE$也可用辐照度表示如下：

$$E_{MPE}=\frac{H_{\text{单}}}{t}=\frac{0.135\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}}{10^{-3}\ \text{s}}=135\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$$

A5 标称眼危害距离(*NOHD*)

*NOHD*表示在理想条件下其辐照度或辐照量低于相应的MPE的距离。

距激光源为r的距离上的辐照度由下式给出：

$$E=\frac{4P_0e^{-\mu r}}{\pi(a+r\phi)^2}\qquad\cdots\cdots(1)$$

注：假定光束是高斯分布，a和ϕ是在光束分布的$1/e$处测量的。实际上，仅有气体激光器产生的光束具有高斯分布，显然，多数固体激光器有着明显不规则多模光束结构，在后一种情况下，应当使用下列公式：

$$L=\frac{Ie^{-\mu r}}{r^2}$$

式中：I——辐射强度，$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$(测量见8.2)。

如果I不知道并且也不能测量，对于已知为多模光束结构的激光系统，公式(1)里的P_0值要增加2.5倍。

对于大多数用途来说，用于计算大气衰减 的 $e^{-\mu r}$项可以忽略。

公式(1)简化为：

$$E = \frac{4P_0}{\pi(a + r\phi)^2} \quad \cdots\cdots(2)$$

式中，用 E_{MPE}替代 E，r 变成 $NOHD$，$NOHD$ 的解答表达式为：

$$NOHD = \frac{\sqrt{4P_0/\pi E_{MPE}} - a}{\phi} \quad \cdots\cdots(3)$$

如果包括大气衰减作用，则无法对公式(1)中的 r 项简单求解。然而，下述方法将获得更为安全的结果：

$$r_\mu = 0.5\, r_c(1 + e^{-\mu r_c}) \quad \cdots\cdots(4)$$

式中：r_μ——有大气衰减的距离；

r_c——公式(3)计算出的距离。

大气衰减系数 μ 的可靠计算可由下列公式得出：

$$\mu = 10^{-3} \times \frac{3.91}{V} \times \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^A \mathrm{m}^{-1} \quad \cdots\cdots(5)$$

式中：A——$0.585\ V^{0.33}$；

V——视距，km；

λ——波长，μm($0.4<\lambda<2$)。

光学观察辅助器的应用

在用观察辅助器(望远镜、双目镜等)观察激光辐射源处，由进入眼睛的辐射量的增加计算出扩展 $NOHD$ 是必要的。

如果光学观察辅助器的出射孔直径不大于 7 mm，进入眼睛的辐射量增加依赖如下因子：

$$G = \frac{\text{物镜直径或观察辅助器孔径}}{\text{理论上的瞳孔直径}} = \frac{D_0}{7 \times 10^{-3}}$$

在光束直径大于物镜聚焦直径，且出瞳直径小于眼睛瞳孔直径的最坏的情况下，扩展源的 $NOHD$ 则变为：

$$NOHD = \text{基本 } NOHD \times G + \frac{a(G-1)}{\phi}$$

除非装有专门的激光衰减滤光片，观察光学器不应考虑透光损耗，因为许多器件在扩展到2 000 nm 以上远红外辐射谱区都具有高透射比(0.8)。

注：只要满足辐射波长在 400 nm～1 400 nm 之间的扩展源裸眼观看的准则，就可通过光学放大器件，经过漫射屏幕或非镜反射目标来观察 1 类、2 类和 3 类激光器的输出。

例 A5-1：

一台激光器输出功率 4 W，光束发散度是 0.7 mrad，且出射光束直径 1 mm。如果相应的 MPE 是 10 W·m^{-2}，假定大气衰减可忽略，试计算 $NOHD$。

解答：

代进公式(3)：

$$NOHD = \frac{\sqrt{(4 \times 4)/10\pi} - 0.001}{0.7 \times 10^{-3}}\mathrm{m} = \frac{0.713\,6 - 0.001}{0.7 \times 10^{-3}}\mathrm{m} = 1.018\ \mathrm{km}.$$

例 A5-2：

在上述例题中运用扩束器把激光束发散角减小到 0.1 mrad，且出射光束直径增加到 7 mm，计算 $NOHD$。

解答：

$$NOHD = \frac{\sqrt{(4 \times 4)/10\pi} - 7 \times 10^{-3}}{0.1 \times 10^{-3}} = 7.07\ \text{km}$$

既要注意光束发散度对确定 $NOHD$ 的重要性，也要注意在这种情况下，出射光束直径 a 可以忽略不计。

例 A5-3：

在例 A5-2 中的激光器工作在 550 nm，假定视距是 20 km，试计算修正的 $NOHD$。

解答：

用公式(5)得出大气衰减系数 μ：

$$\mu = 10^{-3} \times \frac{3.91}{20} \times \left(\frac{0.55}{0.55}\right)^{A} = 1.95 \times 10^{-4}\quad \text{m}^{-1}$$

从公式(4)中可获得修正的 $NOHD$：

$$r_\mu = 0.5 \times 7.07(1 + e^{-(1.95\times10^{-4}\times7.07\times10^{3})})\text{m} = 4.4\ \text{km}$$

注：公式(1)给出的精确解 $NOHD$ 为 4.3 km。

例 A5-4：

一台测量用的输出功率为 3 mW 的氦-氖激光器(λ=633 nm)，发射光束的起始直径为 13 mm，距离激光器 50 m 处扩展为 18 mm。

a）从激光器 65 m 处直接观察，多长时间安全？

b）对周期为 3 min 的这种激光器直接观察，其最短安全距离？

解答：

a）输出功率 $P_0=3\times10^{-3}$ W，起始光束直径 a=0.013 m。因此光束的发散度为：

$$\phi = \frac{0.018 - 0.013}{50}\text{rad} = 10^{-4}\text{rad}$$

在照射持续时间为 10 s～10^4 s 的情况下，相应 MPE 在表 6 中给出。与转效点 T_2 相关的照射时间 t 存在两种可能性：

第一种情况：如果照射时间 $t<T_2$：

$$H_{MPE} = 18\ C_6 t^{0.75}\ \text{J} \cdot \text{m}^{-2}$$

等效为：

$$E_{MPE} = 18\ C_6 t^{-0.25}\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

第 2 种情况：如果照射时间 $t>T_2$：

$$H_{MPE} = 10^2\ C_3 C_6\ \text{J} \cdot \text{m}^{-2}$$

等效为：

$$E_{MPE} = 10^2\ C_3 C_6 t^{-1}\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

注：在表 1～表 4 的注中列出了所有修正因子。辐照度表示式对所涉及问题的解答是一个更方便的形式。

这是点光源典型的观察条件；因此 $\alpha \leqslant \alpha_{\min}$ 且 $C_6=1$(应该强调指出，这种源的尺寸永远不是激光器输出光束的直径除非漫射器或激光阵列是输出光孔)。

照射时间转效点 T_2，依赖于波长且由下式给出：

$$T_2 = 10 \times 10^{0.02(\lambda-550)}\text{s} = 10 \times 10^{0.02(633-550)}\text{s} = 457\ \text{s}$$

这部分问题的求解是使上述给出的辐照度 MPE 与距离 r 处的辐照度(即等式 1)相等，解出照射时间 t。那么，假设第一种情况有效(即 $t<T_2$)，最大照射时间由下式对 t 求解而得出：

$$E_{MPE} = 18t^{-0.25} = \frac{4P_0}{\pi(\alpha + r\phi)^2}$$

$$18t^{-0.25}\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2} = \frac{4 \times 3 \times 10^{-3}}{\pi(0.013 + 65 \times 10^{-4})^2}\text{W} \cdot \text{m}^{-2} = 10.05\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

则，

$$t = \left(\frac{10.05}{18}\right)^{-4} = 10.3 \text{ s}$$

照射时间 $t=10.3$ s 小于 T_2，所以没有理由再评定第二种情况。

b）最小的安全观察范围可由公式(3)对标称眼危害距离（$NOHD$）求解而得出。在这种情况下，照射时间 $t=180$ s 仍然小于 T_2，因此第一种情况仍然适用：

$$r_{NOHD} = \frac{1}{\phi} \times \left\{\sqrt{\frac{4P_0}{\pi E_{MPE}}} - a\right\}$$

$$r_{NOHD} = \frac{1}{10^{-4}} \times \left\{\sqrt{\frac{4 \times 3 \times 10^{-3}}{\pi \times 18 \times (180)^{-0.25}}} - 0.013\right\} \text{m} = 148.8 \text{ m}$$

注：正如此例所示，对于短距离“a”比“$r\Phi$”更为重要。对短距离的安全计算，忽略大气对光束的衰减是可行的；这种忽略部分补尝了激光束强度在远场的非均匀性。

例 A5-5：

一台手持式红外激光测量仪有如下特性：

波长 λ 为 903 nm；

脉冲重复率 F 为 300 Hz；

脉冲功率 P_p 为 30 W；

脉冲能量 Q_p 为 6×10^{-7} J；

光束发散度 Φ 为 10 mrad；

有效出射孔径（等效于圆截面光束）为 55 mm。

试确定这台仪器的 $NOHD$：a）裸眼观察，b）用 8×50 的双目镜观察。

解答：

a）裸眼观察条件

评估一台脉冲激光源分三个阶段：前两个阶段是依据进入眼睛的光脉冲，第三个是决定于多脉冲照射的叠加和平均效应。

这是光束内视观察条件，因而 $C_6=1$。如果不是有意观察，所用照射时间为 100 s；在这段时间内的脉冲数是：

$$N = F \times t = 300 \text{ Hz} \times 100 \text{ s} = 3 \times 10^4$$

单脉冲的评估

由这台激光器的规定条件 700 nm<λ<1 050 nm，通过 30 W×t_p=6×10^{-7} J 给出的脉宽 t_p 得到 $t_p=20$ ns。

表 6 给出了该辐射照射时间为 20 ns 的单脉冲 MPE：

$$H_{MPE} = 5 \times 10^{-3} C_4 C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

式中：$C_4=10^{(903-700)/500}=2.55$ 和 $C_6=1$。

对多脉冲的评估

根据 13.3 来计算减小了的单脉冲 MPE，使用修正因子 $N^{-1/4}=7.60\times10^{-2}$。

$$H_{MPE.单} = H_{MPE} = 5 \times 10^{-3} \times 2.55 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} = 1.275 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$H_{MPE.串} = N^{-1/4} H_{MPE.单} = 7.60 \times 10^{-2} \times 1.275 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} = 9.69 \times 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

辐照度的相应值可从 $H_{MPE.串}$ 值导出：

$$E_{MPE.串} = \frac{H_{MPE.串}}{t_p} = \frac{9.69 \times 10^{-4}}{20 \times 10^{-9}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 4.84^{1)} \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

为了求出超过单脉冲阈值的距离，利用上例中的距离公式：

$$r_{NOHD} = \frac{1}{\phi} \times \left\{\sqrt{\frac{4P_p}{\pi E_{MPE.串}}} - a\right\}$$

$$r_{NOHD}=\frac{1}{0.01}\times\left[\sqrt{\frac{4\times30}{\pi\times4.84\times10^{4}}}-0.055\right]\text{m}=-2.68\ \text{m}$$ [1]

r_{NOHD}是一个负值。因此，按照依据单脉冲阈值为基础的多脉冲评估，这个激光束在任何距离进行照射都是安全的。

平均照射量评估

由表 6，100 s 照射的 MPE 是：

$$H_{MPE}=18\ t^{0.75}\ C_4C_6\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}$$

式中：$C_4=2.55$ 和 $C_6=1$。

脉冲串的平均辐照度极限（见 13.3）为下式：

$$E_{MPE,平均}=\frac{H_{MPE}}{t}=\frac{18\times100^{0.75}\times2.55}{100}\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}=14.5\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$$

脉冲串的平均功率是：

$$P_{平均}=P_p\times t_p\times F=30\ \text{W}\times20\times10^{-9}\ \text{s}\times300\ \text{Hz}=1.8\times10^{-4}\ \text{W}$$

因此该距离的极限值如下：

$$r_{NOHD}=\frac{1}{\phi}\times\left[\sqrt{\frac{4P_{平均}}{\pi E_{MPE,平均}}}-a\right]$$

$$r_{NOHD}=\frac{1}{0.01}\times\left[\sqrt{\frac{4\times1.8\times10^{-4}}{\pi\times14.5}}-0.055\right]\text{m}=-5.10\ \text{m}$$

这个结果是负的。那么根据平均辐照度，仪器在任何距离用裸眼观察都是安全的。因此，对应这台仪器的 $NOHD$ 是零，这里只是用裸眼观察。

b）双目镜观察条件

这台仪器的出瞳直径是 50/8 mm=6.25 mm。因为它小于 7 mm，所以假定全部辐射进入眼睛。

由下式给出眼睛处的辐照度比仪器物镜处的辐照度增加量：

$$G^2=\left(\frac{D_0}{7\times10^{-3}}\right)^{-2}=\left(\frac{5.0\times10^{-2}\ \text{m}}{7\times10^{-3}\ \text{m}}\right)^{2}=51$$

式中假定通过仪器光学系统无衰减。

由于在这种情况下，单脉冲的估计给出对 r 最严格的条件，因此，必须用减小单脉冲的 MPE（$E_{MPE,单}$）来确定 $NOHD$。在物镜处最大允许辐照度被因子 G^{-2}缩小。

$$E_{MPE}(双目镜)=G^{-2}\times E_{MPE}(裸眼)=1.96\times10^{-2}\times4.84\times10^{4}=949\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$$

在激光单脉冲辐照度降至 949 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$处的距离由下式给出：

$$r_{NOHD}=\frac{1}{0.01}\times\left[\sqrt{\frac{4\times30}{\pi\times949}}-0.055\right]\text{m}=14.6\ \text{m}$$

因此，通过这架双目镜在小于 14.6 m 距离内观察这台激光器是有害的。

这个示例用来阐明与在开扩区使用不可见辐射激光有关的危害。因为分类要求会聚光学元件的直径为 50 mm，上述激光产品应是 3B 类。

例 A5-6：

一台钕玻璃 Q 开关激光测距仪有如下特性：

波长 1060 nm；

脉冲峰值功率 P_p=1.5 mW；

每个脉冲能量 45 mJ；

脉冲重复率 12/min；

采用说明：

1］ 原文有误，原文为 4.82，应为 4.84。

出射孔光束直径 10 mm；

光束发射角 1 mrad。

根据单脉冲阈值求出有效 $NOHD$ 是多少？a）对裸眼的照射量，b）通过直径 50 mm 的光学器件进行光束内视。（在这些计算中光束衰减效应或由大气传输引起的折射聚焦忽略不计。）

解答：

a）对裸眼条件

由 $1.5\times10^{6}\ \mathrm{W}\times t_{p}=45\times10^{-3}\ \mathrm{J}$ 能计算出脉宽 t_p，给出 $t_p=30$ ns（即 $10^{-9}\ \mathrm{s}<t_p<5\times10^{-5}\ \mathrm{s}$）。脉冲重复频率 $F=12/60=0.2$ Hz。

这是光束内视条件，那么 $C_6=1$，如果不是有意观察，所用照射时间为 100 s；在此期间的脉冲数为：

$$N = F \times t = 0.2\ \mathrm{Hz} \times 100\ \mathrm{s} = 20$$

单脉冲的评估

从表 6 查出，这台激光器单脉冲照射的 MPE 是：

$$H_{MPE} = 5 \times 10^{-2} C_6 C_7\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}$$

式中：$C_6=1$ 和 $C_7=1$。

多脉冲的估计

用修正因子 $N^{-1/4}=4.73\times10^{-1}$ 计算 $H_{MPE,单}$（见 13.3）

$$H_{MPE,单} = H_{MPE} = 5 \times 10^{-2}\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}$$

和

$$H_{MPE,串} = H_{MPE,单} N^{-1/4} = 5 \times 10^{-2} \times 4.73 \times 10^{-1} = 2.36 \times 10^{-2}\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}$$

从 $H_{MPE,列}$ 值，可以导出相应的辐照度值：

$$E_{MPE,串} = \frac{H_{MPE,串}}{t_p} = \frac{2.36 \times 10^{-2}}{30 \times 10^{-9}}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}} = 7.87 \times 10^{5}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$$

要根据多脉冲的估计，求出超出阈值的距离，用上例中的距离公式：

$$r_{NOHD} = \frac{1}{\phi} \times \left(\sqrt{\frac{4P_p}{\pi E_{MPE,串}}} - a\right)$$

$$r_{NOHD} = \frac{1}{10^{-3}} \times \left(\sqrt{\frac{4 \times 1.5 \times 10^{6}}{\pi \times 7.87 \times 10^{5}}} - 0.01\right)\mathrm{m} = 1.55\ \mathrm{km}$$

平均照射量评估

查表 6，100 s 照射时间对应的 MPE 是：

$$H_{MPE} = 90 \times t^{0.75} C_6 C_7\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}$$

式中：$C_6=1$ 和 $C_7=1$。

用辐照度表示的 MPE 由下式给出：

$$E_{MPE,平均} = \frac{H_{MPE}}{t} = \frac{90 \times 100^{0.75}\ \mathrm{J \cdot m^{-2}}}{100\ \mathrm{s}} = 28.5\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$$

脉冲串的平均功率是：

$$P_{平均} = P_p \times t_p \times F = 1.5 \times 10^{6}\ \mathrm{W} \times 30 \times 10^{-9}\ \mathrm{s} \times 0.2\ \mathrm{Hz} = 9 \times 10^{-3}\ \mathrm{W}$$

因此，平均照射的 $NOHD$ 由下式给出：

$$r_{NOHD} = \frac{1}{\phi} \times \left(\sqrt{\frac{4P_{平均}}{\pi E_{MPE,平均}}} - a\right)$$

$$r_{NOHD} = \frac{1}{10^{-3}}\left(\sqrt{\frac{4 \times 9 \times 10^{-3}}{\pi \times 28.5}} - 0.01\right)\mathrm{m} = 10.05\ \mathrm{m}$$

测距仪的 $NOHD$ 是已计算的两个 r_{NOHD} 值中的最大值。在这个例子中，最大的 r_{NOHD} 值由多脉冲估计值给出，因此，$NOHD=1.55$ km。

如果在这台仪器的输出孔配置一个10%的透射滤光片，就减小了 $NOHD$。在这种情况下，由于必须考虑最严格的条件，所以必须用单脉冲估计公式计算 $NOHD$。考虑到10%的滤光片的作用，必须用插入因子0.1修正峰值功率。因此，修改后的 $NOHD$ 由下式给出：

$$NOHD = \frac{1}{10^{-3}} \times \left[\sqrt{\frac{4 \times 0.1 \times 1.5 \times 10^6}{\pi \times 7.87 \times 10^5}} - 0.01\right] \mathrm{m} = 483\ \mathrm{m}$$

b）双目镜观察条件

当这台激光器的光束内视通过直径50 mm的聚光器件时，$NOHD$ 因最大允许辐照度的增益因子的减小而增加。增益因子：

$$G^{-2} = \left(\frac{7\ \mathrm{mm}}{50\ \mathrm{mm}}\right)^2 = 1.96 \times 10^{-2}$$

对多脉冲估计的等式，通过插入增益因子 1.96×10^{-2} 进行修改，给出 $NOHD$ 如下：

$$NOHD = \frac{1}{10^{-3}} \times \left[\sqrt{\frac{4 \times 1.5 \times 10^6}{\pi \times 1.96 \times 10^{-2} \times 7.87 \times 10^5}} - 0.01\right] \mathrm{m} = 11.12\ \mathrm{km}$$

因此，由于这台激光器的脉冲持续时间很短，当使用望远镜系统时，即使眼睛受激光最短时间照射，在距离激光器小于11.12 km时也是有害的。

A6 发散光束、点光源的可达发射极限

简介：

每当不满足扩展光源的观察条件，即每当表观光源（例如高发散光束的束腰）以角 α 在视网膜上成像，而该角 α 不大于在测量距离（不小于100 mm）处确定的极限对向角 α_{min} 时，则是处于光束内视状态。作为这种光源的例子有激光束（平行的或聚焦的）、穿过一个小孔的光束、光纤末端或半导体激光器的发射表面。

在这一部分所有的例子均假定从点光源发射的光束是发散的（即非平行光）且远场光束分布是高斯型。作为对许多发散光束源（例如光学纤维）的一种保守估计，高斯近似简化计算且工作良好。另外，所有例子均假定有意观察不是所述光源设计功能的固有要求，因此，时间基准为100 s（见9.3中的e））。

发散光束的直径：

需要距表观光源 r 处的发散光束的直径 d_{63}，以进行包括窗口的 AEL 和 MPE 计算。多数发散光源的制造厂商用数值孔径或 NA 注释发散性。点光源 NA 的定义为输出光束以5%的峰值辐照度点测量的发散角 ϕ 一半的正弦。即：

$$NA = \sin\frac{\phi}{2}$$

和

$$\frac{\phi}{2} = \arcsin(NA)$$

对于高斯光束，对应5%峰值辐照度点的直径包括总功率或能量的95%。距表观光源 r 处的光束直径 d_{95} 由下式给出：

$$d_{95} = a + 2r\tan\frac{\phi}{2} = a + 2r\tan(\arcsin(NA))$$

由于"a"是几十个 μm 的量级，在多数情况下可以忽略。另外，用于安全计算的光束直径是用总功率（或能量）63%的点而不是95%的点。高斯光束的转换因子是1.7（即 d_{95}/d_{63}）；因此，光束直径可近似为：

$$d_{63} = \frac{d_{95}}{1.7} = \frac{2r}{1.7}\tan(\arcsin(NA)) = \frac{2rNA}{1.7} \quad \cdots\cdots(1)$$

一个单模光纤是点光源的特殊情况。单模光纤的发散度用光纤模场直径 w_0 和光源的波长 λ 规定。在距离 r 处，单模光纤的光束直径可近似为：

$$d_{63}=\frac{2\sqrt{2}r\lambda}{\pi w_0} \qquad \cdots\cdots(2)$$

式中，波长 λ 和模场直径 w_0 用同样的单位表示。

通过窗口的功率：

多数分类方法要求测量通过位于距表观光源特定距离的特定窗口的功率(或能量)。对高斯光束，通过位于距离 r 处，直径 d_a 圆孔的总功率(或能量)中的部分，可以用一个耦合参数表示：

$$\eta=1-e^{-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2} \qquad \cdots\cdots(3)$$

式中：d_{63}是光束直径，由该窗口距离处 63%的点(即高斯光束 $1/e$ 的点)确定。

通过窗口的总功率(或能量)为：

$$P_a=\eta P_0 \text{ 或 } Q_a=\eta Q_0 \qquad \cdots\cdots(4)$$

式中：$P_0(Q_0)$为从表观光源发射的总功率(总能量)。

例 A6-1：

一个光纤发送器，数值孔径 0.3，从 100 μm 芯径的多模光纤中发射出波长为 850 mm 的光。如果发送器工作在连续波运转状态，1 类 *AEL* 允许的最大总功率是多少？

解答：

1 类系统用的时间基准是 100 s。表 1 表明在 1.8×10^{-5} s～1 000 s 时间内，在波长范围 700 nm～1 050 nm内发射的 *AEL* 用下式表示：

$$Q_{AEL}=7\times10^{-4}t^{0.75}C_4C_6\,J$$

式中：$C_4=10^{0.002(\lambda-700)}$

$C_6=1$(点光源)

注：所有的修正因子都列于表 1～表 4 的注中。

$$P_{AEL}=\frac{Q_{AEL}}{t}$$

因此，对于这个例子，*AEL* 是：

$$P_{AEL}=7\times10^{-4}\times100^{-0.25}\cdot(10^{0.002(850-700)})\text{ W}=2.2\times10^{-4}\times(2.00)\text{ W}=0.44\text{ mW}$$

在 8.2 给出的分类测量规范表明，P_{AEL}必须与通过距光源 100 mm 处的 50 mm 光阑孔收集的功率对比，在这个示例中测量距离处的光束直径为：

$$d_{63}=\frac{2rNA}{1.7}=\frac{2\times100\times0.3}{1.7}\text{ mm}=35\text{ mm}$$

通过测量光阑孔的整个发射功率的部分为：

$$P_a=\eta P_o=\left[1-\mathrm{e}^{-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2}\right]P_0\doteq\left[1-\mathrm{e}^{-\left(\frac{50}{35}\right)^2}\right]P_0=0.87\,P_0$$

用 P_a 与 P_{AEL}相等，得到最大 1 类输出功率：

$$P_{o,\max}=\frac{P_{AEL}}{\eta}=\frac{0.44}{0.87}=0.51\text{ mW}$$

对于连续工作，这是最大总输出功率值，在这种占空比为 50%的数字发送情况下，脉冲序列中一单个脉冲的功率可提高到上述导出的连续波功率的两倍(取决于脉冲序列的特性，见 9.4，重复脉冲激光器或调制激光器)。

例 A6-2：

一个光纤发送器以 780 nm 发射用于数字数据传输，传输速率为 125 Mbits/s。所用传输代码是平衡码(即在二个或三个字节长的任何组内，0 码和 1 码的数目相等)，因而发射的平均功率与数据无关。已确定产品的发送器出口的数值孔径在 0.16～0.18 范围内。3A 类 *AEL* 所允许的最大平均功率是多少？

解答：

由于是调制发射，必须考虑 9.4 中对重复脉冲和调制激光器的要求。高数据速率(即短脉冲时间)导

致 9.4 中三种要求最严格的一种要求“b)”。在这种情况下，视发送器发射平均功率为连续波光源的功率。

3A 类在表 3 中规定既有功率(或能量)的 *AEL* 又有幅照度(或辐照量)的 *AEL*，两者最严格的情况是用于产品的极限。另外，产品最坏情况的 *NA*(即，最小值)是必须用于安全计算的值。

总功率的 3A 类 *AEL* 表示为：

$$Q_{1,AEL} = 3.5 \times 10^{-3} t^{0.75} C_4 C_6 \ \mathrm{J}$$

$$P_{1,AEL} = \frac{Q_{1,AEL}}{t}$$

式中：C_4 和 C_6 在表 1～表 4 的注中给出。

时间基准为 100 s，求得的 *AEL* 值为：

$$P_{1,AEL} = 3.5 \times 10^{-3} \times 100^{-0.025}(10^{0.002(780-700)}) \ \mathrm{W} = 1.1 \times 10^{-3} \times 1.45 \ \mathrm{W} = 1.6 \ \mathrm{mW}$$

由于源的 *NA* 小，发射功率 100%将通过距源 100 mm 的一个 50 mm 光阑孔收集，无需为光阑孔修正(即 $P_{1,max}=P_{1,AEL}$)。

辐照度 *AEL* 表示式为：

$$H_{2,AEL}{}^{1]} = 18\, t^{0.75} C_4 C_6$$

$$E_{2,AEL}{}^{2]} = \frac{H_{2,AEL}{}^{1]}}{t} = 18 \times 100^{-0.25} \times 10^{0.002(780-700)} \times 1.0 \ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$$

$$= 5.7 \times 1.45 \ \mathrm{W \cdot m^{-2}} = 8.3 \ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$$

通过借助计算表 7 中规定的圆形孔径光阑收集的功率，这个辐照度 *AEL* 值可与总功率值相关。对这个例子，眼睛的光阑直径为 7 mm，由辐照度和孔径面积而求得光阑功率：

$$P_{2,AEL} = E_{2,AEL} \left[\frac{\pi}{4} d_a^2\right] = 8.3\left[\frac{\pi}{4}(0.007)^2\right]$$

$$= 8.3 \times 3.85 \times 10^{-5} \ \mathrm{W} = 0.32 \ \mathrm{mW}$$

通过式(3)和(4)定义的耦合参数 η，光孔功率与总发射功率相关。在 100 mm 处测量的光源束径为：

$$d_{63} = \frac{2rNA}{1.7} = \frac{2 \times 100 \times 0.16}{1.7} \ \mathrm{mm} = 19 \ \mathrm{mm}$$

因此，辐照度 *AEL* 值允许的最大平均功率为：

$$P_{2,max} = \frac{P_{2,AEL}}{\eta} = P_{2,AEL}\left[1 - e^{\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2}\right]^{-1} = 0.32\left[1 - e^{-\left(\frac{7}{19}\right)^2}\right]^{-1} = 0.32/0.13 = 2.5 \ \mathrm{mW}$$

由于从总功率 *AEL* 求得的最大平均功率小于从辐照度 *AEL* 求得的最大平均功率，它成为本例所述产品的极限功率。因此，$P_{平均,max}=P_{1,max}=1.6$ mW。

例 A6-3：

一台以 1 300 nm 发射的光纤发送器，用于进行数字数据传输，传输速率为 630 Mbits/s。所用传输代码是平衡码，因而发射的平均功率与数据无关。发送器的组件与具有模场直径 10 μm 的单模光纤相连接。a) 3A 类 *AEL* 允许的最大平均功率是多少？b) 如果波长是 1 550 nm，3A 类 *AEL* 允许的最大平均输出功率是多少？

解答：

正如例 A6-2 一样，由于高数据传输率和平衡码，其输出可当作处理连续波发射处理，功率水平等于平均发射功率。另外，必须满足表 3 所列的两个 *AEL* 条件：一个是对总发射功率，另一个是对辐照度。

a) 波长 1 300 nm 时，*AEL* 对总发射功率的表达式为：

采用说明：

1] 原文有误，原文为 $Q_{2,AEL}$，应为 $H_{2,AEL}$。

2] 原文有误，原文为 $P_{2,AEL}$，应为 $E_{2,AEL}$。

$$P_{1,max}=P_{1,AEL}=\frac{1.8\times10^{-2}t^{0.75}C_6C_7}{t}$$

$$=1.8\times10^{-2}\times100^{-0.25}\times1\times8\ \text{mW}=46\ \text{mW}。$$

式中时间基准 $t=100$ s,$C_6=1$(点光源)和 $C_7=8$(1 300 nm)。由于单模光纤的窄光束散射度,发射功率的100%被耦合到距光源100 mm的50 mm光阑孔中。因此,光阑孔耦合参数 η 是1而且总功率条件下的最大平均功率可等于 *AEL* 值情况(即 $P_{1,max}=P_{1,AEL}$)。

由辐照度条件求得 *AEL* 为:

$$E_{2,AEL}=\frac{90t^{0.75}C_6C_7}{t}=90\times100^{-0.25}\times1\times8\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}=230\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$$

正如例A6-2一样,这个辐照度值可与最大发射功率值相关。首先,由辐照度乘以测量光阑孔(直径7 mm)的面积得到光阑孔功率。

$$P_{2,AEL}=E_{2,AEL}\left[\frac{\pi}{4}d_a^{\ 2}\right]=230\times3.85\times10^{-5}\ \text{W}=8.9\ \text{mW}$$

然后,光阑孔用耦合参数 η(在公式(3)中定义)耦合损耗修正之后光阑孔功率以获得辐照度 *AEL* 条件的最大发射功率水平。耦合参数取决于位于光源一定距离(100 mm)光阑孔处的光束直径。在这个对单模光纤的例子中,光束直径由公式(2)给出:

$$d_{63}=\frac{2\sqrt{2}r\lambda}{\pi w_0}=\frac{2\sqrt{2}\times100\times1.3}{\pi\times100}\ \text{mm}=12\ \text{mm}$$

这样,由下式得出辐照度条件下的最大平均功率:

$$P_{2,max}=\frac{P_{2,AEL}}{\eta}=P_{2,AEL}=\left[1-e^{-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2}\right]^{-1}=8.9\left[1-e^{-\left(\frac{7}{12}\right)^2}\right]^{-1}=31\ \text{mW}$$

由于从辐照度条件获得的最大平均功率小于从总功率条件获得的最大平均功率,在本例中,它变成1 300 nm激光产品的极限值。因此,$P_{平均,max}=P_{2,max}=31$ mW。

b) 同一系统工作在1 550 nm时,计算过程相同,只是其中所用的 *AEL* 表达式和光阑孔与1 550 nm波长有关。第1个条件源于通过距光源100 mm处的50 mm光阑孔的总功率为:

$$P_{1,max}=P_{1,AEL}=50\ \text{mW}$$

第2个条件源于通过距光源100 mm处的3.5 mm光阑孔(见表7)的辐照度为:

$$P_{2,max}=\frac{E_{2,AEL}\left[\frac{\pi}{4}d_a^{\ 2}\right]}{1-e^{-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2}}$$

$$=\frac{1\ 000\left[\frac{\pi}{4}(0.0035)^2\right]}{1-e^{-\left(\frac{3.5}{14}\right)^2}}$$

$$=\frac{9.6\times10^{-3}}{0.061}\ \text{W}=157\ \text{mW}$$

式中,$d_{63}=14$ mm,由公式(2)获得。

在该情况下,最大平均功率发射限值确定总功率条件,那么,$P_{平均,max}=P_{1,max}=50$ mW。

附 录 B
（提示的附录）
医 学 原 理

B1 眼的解剖（见图B1）

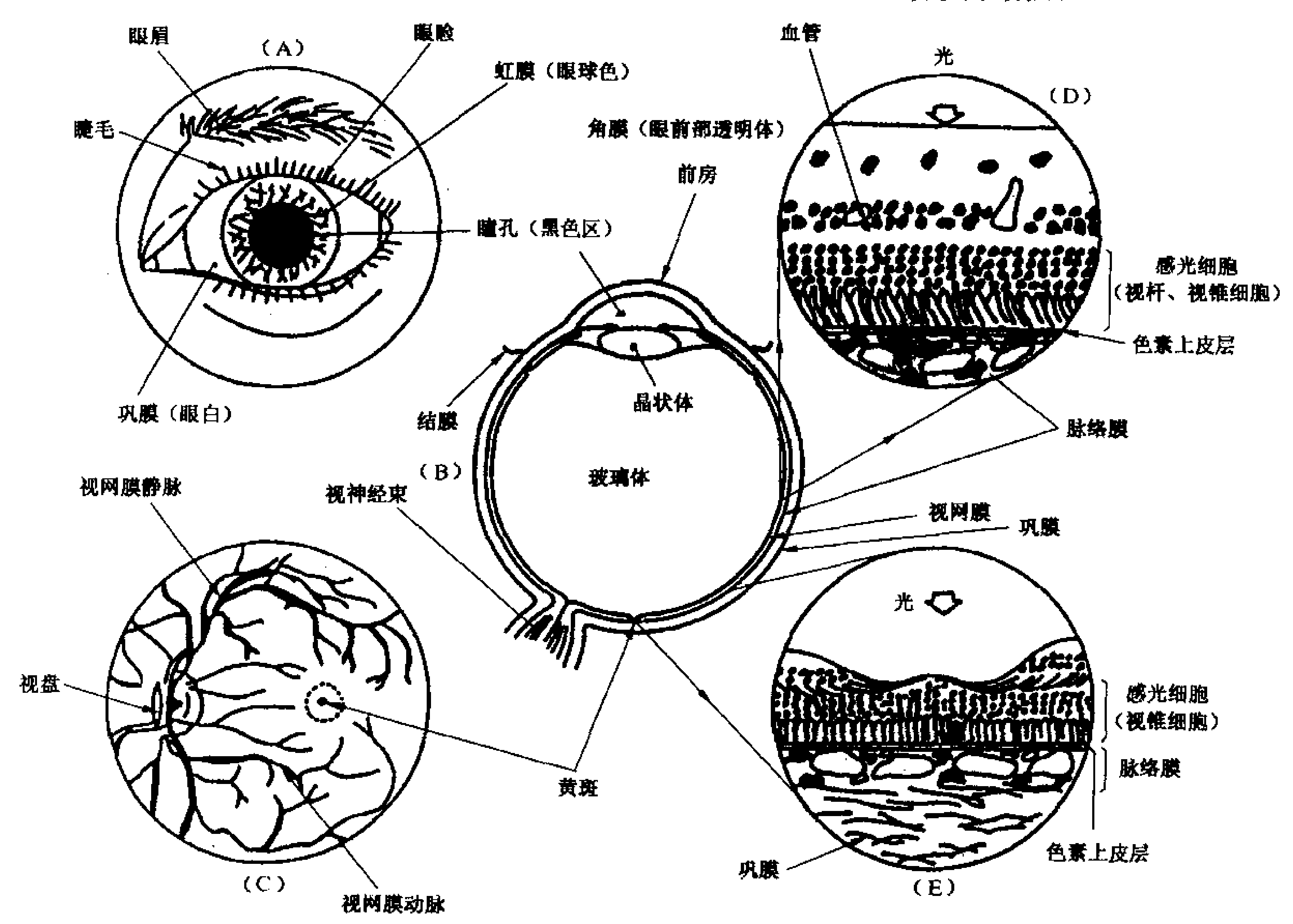
图B1（A）为左眼的外部结构图。睑裂限制了眼的可见区域，使眼呈杏仁状。眼前部的主要结构被标出，虚线和箭头指出眼睛的各部位。

图B1（B）为左眼的水平切面图。眼睛分为两部分，前部或以角膜、虹膜、晶状体为界的前房；后部或以视网膜为界和含有凝胶状玻璃体的眼杯。

图B1（C）为检眼镜下所见的正常左眼眼底。检眼镜的光束通过瞳孔直接照亮内部，所见到的图像是眼底。眼底是微红色，可清晰地看到较大的视网膜血管，其他突出的结构是白色的视盘和黄斑。黄斑是视网膜表面的一个凹陷，色素较周围视网膜的多，是视觉最敏锐区。

图B1（D）是剖面图，图B1（B）中所见到的视网膜结构，但是它比活体放大了约320倍。视网膜由一组神经细胞层组成，最上面是感光的杆体和锥体细胞，即光射到视网膜表面，必须通过神经细胞层，才能到达感光细胞。锥体、杆体细胞层的下面是色素上皮层，它含有黑褐色的黑色素。色素上皮层下面是微细毛细血管层，即脉络膜毛细管层。脉络是主要的吸收层，它既含有色素细胞，又含有血管。

图B1（E）是放大约150倍的黄斑区结构，黄斑区仅有锥体细胞。神经细胞径向移动而远离视力最敏锐区。黄斑部的色素位于Henle纤维层内，它对400 nm～500 nm的光吸收力最强。



图B1 眼的解剖

B2 激光辐射对生物组织的影响

激光辐照引起损伤的机理，对于所有的生物系统来说都是相似的。可以包括热反应、热声瞬变和光化学相互作用的过程。上述任何一种机理引起损伤的程度均与辐照源的某些固有物理参数有关，其中最重要的是波长、脉宽、聚焦尺寸、辐照度和辐照量。

概括地讲，在超阈值照射中，主要的损伤机理与照射的持续时间有关。随着脉冲持续时间的逐渐延长，在如下的时间范围内，起主要作用的损伤机理是：照射时间为纳秒和亚纳秒时，主要是声瞬变效应；照射时间为 100 ms 至数秒时，为热效应；照射时间超过 100 s 时，为光化学效应。

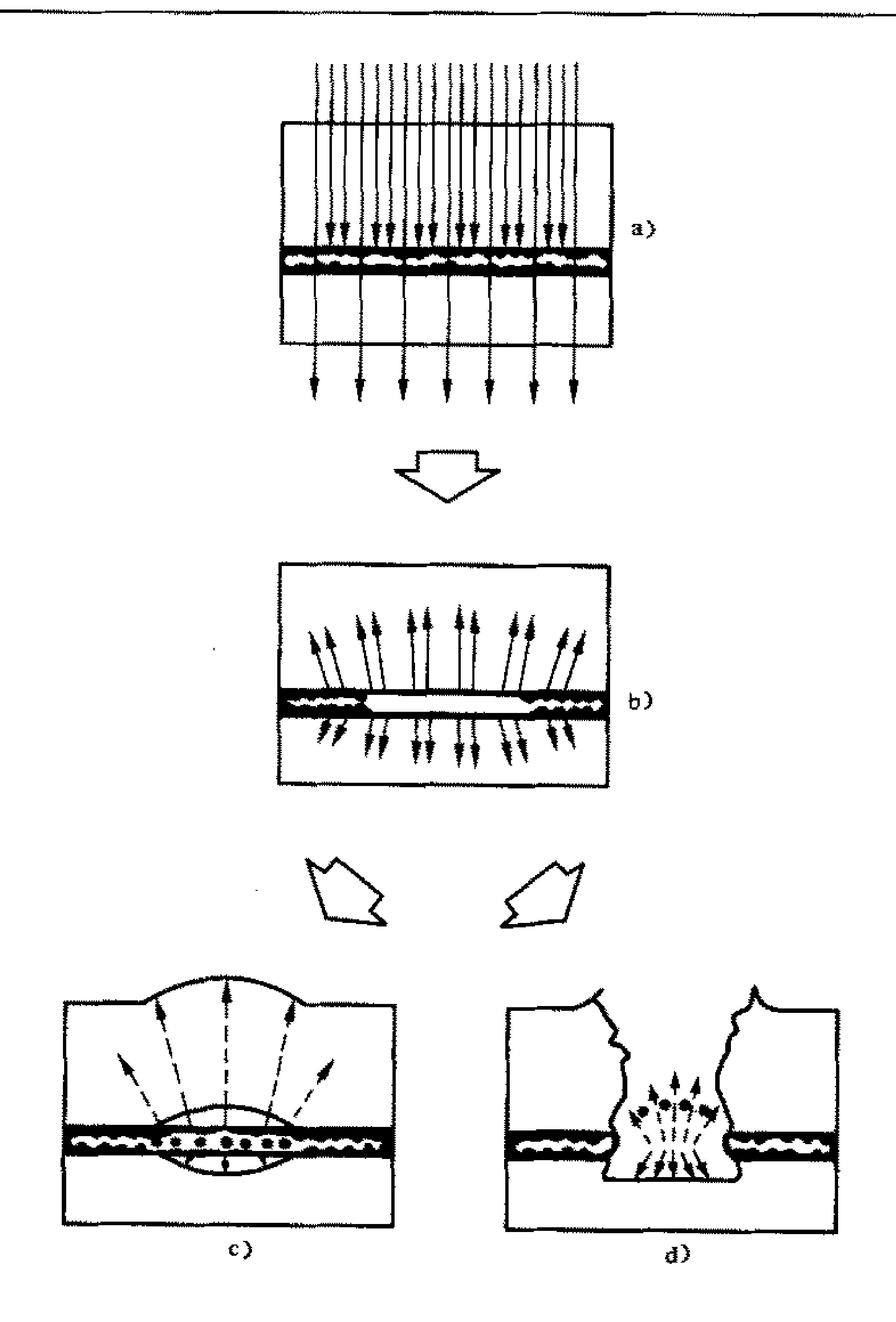
激光辐照，其光束准直性与许多其他已知的辐照类型不同，所加光辐照初期含有高能量，使得过多的能量传导到生物组织中。各种激光辐照时对生物器官的损伤主要是由于该器官对辐照的吸收所致。

吸收发生在原子与分子水平上，是一种波长特有的过程。因此，波长决定了一台特定的激光器引起的那种组织损伤。当一个系统吸收了足够的辐照能量时，其组成分子的振动增加，这是一种热容量的增加。多数激光损伤是由于部位的组织受热而致。这种热损伤通常局限在激光能量吸收部位的边缘区与辐照光束内。此区域内的细胞明显地烧伤。组织的损伤主要是由于蛋白质变性引起。以上所述表明，激光二次损伤的发生可能与组织受热反应的时间有关，反应的时间又直接地与激光的脉宽有关（图 B2）。如果一台连续波或长脉冲激光装置直接照射组织，由于传导而使受照射组织区的温度逐渐增高。当越来越多细胞的温升超过他们所耐受的温度时，这种热扩散就可导致损伤面积的增加。由于传导是光斑聚焦大小的函数，它决定了周边扩散的程度及最初组织受热区的温度，因此，对于损伤来说，光斑（光束影像）大小也是非常重要的。这种类型的热损伤在连续照射和长脉冲激光照射中常常可以见到。另一方面，损伤效应也可能是特殊分子吸收了所给定光的直接结果。这一过程是由于给定光能的吸收而产生，而不是能量的释放。然而，这种反应是分子激发态的一种独特的化学反应，此反应是低剂量照射损伤的主要原因。

短脉冲、高峰值功率（即 Q 开关或锁模）激光器，通过不同损伤机理的联合作用，可加重组织损伤。能量在极短的时间内释放到生物靶标上，受照射部位产生很高的辐照度。靶标组织受到如此快的温度升高，致使组织细胞由液态变为汽态。在多数情况下，这些相变极快，可使组织爆裂，细胞崩解。由此产生的压力瞬变，在烧伤中心的外周缘产生一个环状的爆破带。相似的压力瞬变亦可由热膨胀引起，以上两种压力瞬变均可由于部分组织的移位，而导致远隔吸收层部位的组织出现切割状损伤。

中等剂量，长时间照射可引起某些生物组织，如皮肤、眼的水晶体，尤其是视网膜的不可逆改变。这种变化是由于分子获得光子而被激活，产生光化学反应的结果。如果辐照时间太长，或虽是短时间照射，但重复照射的时间太长，那么这种光化学导致的变化就可引起器官的损伤。

激光作用于视网膜时，上述的所有损伤机理均已被见到。



a) 组织吸收激光能量。

b) 所吸收能量传导到周围的组织上使其受热。

c) 长脉冲或连续激光所导致的热界面的扩大使损伤区域逐渐扩大。

d) 短脉冲高峰值功率激光导致细胞崩解、组织爆裂的损伤。

图 B2 激光辐射对生物组织损伤的示意图

B2.1 对眼的危害

在第 B1 章中，重点叙述了眼的解剖。眼特别适合于接收和传导光辐照，眼对于不同波长辐照光的吸收特性见图 B2，因过量照射引起的有关病理学变化概括于表 B1 中。紫外和远红外激光辐射致使角膜损伤，然而可见光与近红外辐射将被透射到视网膜上。

可见光和近红外激光对眼的损伤是特殊的，因为眼球能有效地透射光辐射，这一特性使得含色素较多的组织受到较强的辐照。从角膜到视网膜辐照度的增大近似地为瞳孔面积与其在视网膜的像面积之比。辐照度增大的原因，是因为进入瞳孔的光在视网膜上聚焦成一个"点"。瞳孔是一个可变的孔径，对年青人的眼睛而言，其直径最大可扩张至 7 mm，对应于这样一个瞳孔的视网膜影像，直径可在 10 μm～20 μm 之间。此时，角膜与视网膜之间的辐照度增加了 2×10^5～5×10^5 倍。假如增加了 5×10^5，那么在角膜上为 50 W/m^2 的光束到视网膜上将变为 2.5×10^7 W/m^2。在本标准中，认为 7 mm 的瞳孔是最坏条件下的限制孔径，此值是对年青人最坏情况下的瞳孔直径进行测量而得到的。

如果一束强激光聚焦到视网膜上，仅有一小部分光(5%以上)被视杆和视锥细胞中的视色素所吸

收。而绝大部分光将被色素上皮中的黑色素所吸收(在黄斑区,波长为 400 nm～500 nm 范围内的部分能量将被黄斑色素吸收)。能量的吸收导致局部发热,并灼伤色素上皮和邻近的光敏感视杆细胞和视锥细胞。这种烧伤或损伤可能导致视力的丧失。

这种视力丧失是否是永久性的,取决于照射的强度。视力的下降通常不能发现,只有当黄斑中央部或中心凹损伤时,受到照射的人才会感觉到视力的减退。中心凹是黄斑中央的一个小凹陷,它是视网膜最重要的部分,是视觉最敏锐区。它是视网膜上感受强光(看光照下的物体)的部分。中心凹所对的视角大约相当于月亮所张的角。倘若此区受伤,可出现视野缺损,早期在视觉中央区域出现一个模糊的白点,两周内或更长的时间,白点变为黑斑。最后,患者可能在正常视觉中不会再查觉到这个盲点。然而,当在注视象一张空白纸样的视场时,盲点就可立即显露出来。视网膜的周边只有在发生严重损伤时,病人才会有主观感觉。小的周边损伤不会引人注意,甚至可能在系统的眼科检查中也尚未发现过。

在 400 nm～1 400 nm 波长范围内,最大的危害是视网膜损伤。该波长范围内的辐射可以透过角膜,房水,晶状体和玻璃体。

对于良好的平行光束,因为假设其视网膜像是个直径约为 10 μm 的衍射极限光斑,所以其危害实际上与辐射源和眼之间的距离无关。在这种情况下,假定达到热平衡,则对视网膜的危害决定于最小对向角 α_{min}。

对于扩展源,因为视网膜的辐照度只依赖于该光源的辐射亮度及眼球水晶体的特性,所以其危害实际上也与辐射源和眼之间的距离无关。

对于点型的发散光束光源,其危害随着其束腰和眼之间距离的减少而增加。理由是,随着距离的减少,其收集的功率增加,而视网膜像的大小可假设保持在衍射极限量级(由于眼的调节能力)。最大的危害出现在最短的调节距离上。随着距离的进一步减小,其危害也减少,这是由于视网膜像迅速变大而辐照度相应减小,即使收集到更大的功率也是如此。

对本标准来说,在 400 nm～1 400 nm 范围内的所有波长上,人眼调节的最短距离定为 100 mm。选择这样一个折衷方案是因为除年轻人和极少近视眼之外,其他人员不能把眼的近距离调节到 100 mm 以下。这个距离可以用来测量光束内视情况下的辐照度(见 8.2 中的 g))。

对于小于 400 nm 或大于 1 400 nm 的波长,最大的危害是眼球水晶体或角膜的损伤。光辐射是被角膜或水晶体优先吸收或者是全部吸收,取决于光辐射的波长(见表 B1)。对于这些波长的发散光束源(扩展源或点源),应该避免使光源和眼的距离太短。

B2.2 皮肤损伤

一般来说,皮肤比眼更能耐受大量的激光辐照。由可见光(400 nm～700 nm)和红外(700 nm～1 060 nm)光谱范围的激光辐射,可使皮肤出现轻度红斑,继而发展成水疱。在极短脉冲、高峰值大功率激光辐照后,表面吸收力较强的组织可出现碳化,而不出现红斑。

极强的辐射可造成皮肤的色素沉着、溃疡、瘢痕形成和皮下组织的损伤。但激光辐射的潜在效应或累积效应还未被普遍地发现。然而一些边缘的研究表明,在特殊条件下,人体组织的小区域可能对反复的局部照射敏感,从而改变了最轻反应的照射剂量,因此在低剂量照射时组织的反应非常严重。

表 B1 过量光照的病理效应一览表

CIE 光谱范围*	眼 睛	皮 肤
紫外辐射 C (180 nm～280 nm)	光致角膜炎	红斑(阳光灼伤) 加速皮肤的老化过程
紫外辐射 B (280 nm～315 nm)		色素沉着
紫外辐射 A (315 nm～400 nm)	光化学反映	暗色 光敏感作用
可见光 (400 nm～780 nm)	光化学和热效应所致的 视网膜损伤	
红外辐射 A (780 nm～1 400 nm)	白内障、视网膜灼伤	皮肤灼伤
红外辐射 B (1.4 μm～3.0 μm)	白内障、水分蒸发 角膜灼伤	
红外辐射 C (3.0 μm～1 mm)	仅为角膜灼伤	

* 使用 CIE 中定义的光谱范围描绘生物效应，可能与 *MPE* 表中光谱波段的划分有所不同。

附 录 C
（提示的附录）
参 考 文 献

Essentials of Lasers　L. Allen (Pergamon Press)
激光基础

Lasers in Industry　S. S. Charschan (Van Nostrand Reinhold) New York, 1972
工业用激光器

Introduction to laser physics　B. A. Lengyel (J. Wiley)
激光物理学导论

Laser Physics　A. Maitland and M. H. Dunn (North Holland Publishing Co.)
激光物理学

Fundamentals of Optics　F. A. Jenkins and M. E. White (McGraw-Hill), 1950
光学基础

Geometrical and Physical Optics　R. S. Longhurst (Longman)
几何光学和物理光学

Lasers and Light　Readings from Scientific American (W. H. Freeman and Col., 1969)
激光和光

Laser applications in Medicine and Biology, Volumes I, II and III 激光在医学和生物学中的应用 I、II、III 卷	M. L. Wolbarsht (Plenum Press) New York, 1971, 1974, 1977
Third Conference on the Laser 第三届激光会议	L. Goldman, Editor (New York Academy of Sciences) Annals of the NY Academy of Science, Vol. 267, 1976
Lasers in Medicine 医用激光器	L. Goldman and R. J. Rockwell (Gordon and Breich), New York, 1971
Safety with Lasers and Other Optical Sources 激光器和其他光源的安全	D. Sliney and M. Wolbarsht (Plenum Press) New York, 1980
Introduction Lasers 激光器导论	D. C. O'Shea, traduit par/translated by A. Blanc (Eyrolles) Paris, 1980
Les lasers 激光器	F. Chabannes (E. N. S. T. A.) Paris, 1980
Les lasers et leurs applications 激光器及其应用	A. Orszag-E. Hepner (Masson) Paris, 1980
Les lasers en Ophtalmologie 眼科激光器	H. Haut. S. Limon, M. Massin, G. Perdiel, Societe francaise d'ophhtalmologie (Masson) Paris, 1981
Biological Bases for and Other Aspects of a Performance Standard for Laser Products 激光产品的生物学基础和激光产品的执行标准的其他方面	F. A. Andersen, USDHHS Publication (FDA) 80-9092, October, 1969

附 录 D
（提示的附录）
附 表

表 D1 本标准中所有物理量一览表

本表概括了本标准所涉及的物理量，且给出了每个物理量所用的单位（以及单位的符号）。SI 基本单位的定义引自 GB 3100，单位和符号引自 GB 3102。

物理量	单位名称	单位符号	定 义
长度	米	m	米是光在真空中（1/299792458）s 时间间隔内所经路径的长度
	毫米	mm	10^{-3}m
	微米	μm	10^{-6}m
	纳米	nm	10^{-9}m
面积	平方米	m^2	1 m^2
质量	千克	kg	千克是质量单位，它等于国际千克原器的质量
时间	秒	s	秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9192631770 个周期的持续时间
频率	赫[兹]	Hz	周期性运动现象为每秒一周的频率等于 1 Hz
平面角	弧度	rad	弧度是一圆内两条半径之间的平面角，这两条半径在圆周上所截取的弧长与半径相等
	毫弧度	mrad	10^{-3} rad
立体角	球面度	sr	球面度是一立体角，其顶点位于球心，而它的球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积
力	牛[顿]	N	$1\ m \cdot kg \cdot s^{-2}$
能	焦[耳]	J	$1\ N \cdot m$
辐照量	焦耳每平方米	$J \cdot m^{-2}$	$1\ J \cdot m^{-2}$
总辐亮度	焦耳每平方米每球面度	$J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$1\ J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$
功率	瓦[特]	W	$1\ J \cdot s^{-1}$
	毫瓦	mW	10^{-3} W
辐照度	瓦特每平方米	$W \cdot m^{-2}$	$1\ W \cdot m^{-2}$
辐亮度	瓦特每平方米每球面度	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$1\ W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$
注：为了方便，单位的倍数和分数单位列于相应处。			

表 D2 制造厂商要求一览表

要求；条号		1类	2类	3A类	3B类*	4类
危害类别的说明	9.2	在可合理预见的情况下是安全的	低功率；由回避反应提供正常的眼保护	与2类相同，通过光学仪器直接进行光束内视有害	直接光束内视可能是有害的	高功率；漫反射可能是有害的
防护罩	4.2	每台激光产品都要求；为了执行产品的功能，限制必要的进入				
防护罩上的安全联锁	4.3	设计用于防止挡板移动，除非可达发射值低于指定类别的 *AEL*				
遥控装置	4.4	无要求			对激光产品设备可以容易地附加外部联锁	
钥匙控制装置	4.5	无要求			当取下钥匙时，激光器不能使用	
发射警告装置	4.6	无要求			当激光器打开或脉冲激光器电容器组充电时，给出可闻或可视警告	
衰减器	4.7	无要求			给出除“通/断”开关之外的暂时切断光路措施	
定位控制装置	4.8	无要求		调节定位后的控制装置位于无高无1或2类 *AEL* 的危险照射的位置		
光学观察仪器	4.9	通过所有光学系统的辐射必须低于1类的 *AEL*				
扫描	4.10	扫描失效不会导致激光产品产生超过其自身类别的辐射				
分类标记	5.1～5.6	要求文字	图14和15及规定文字			
窗口标记	5.7	无要求			要求规定的文字	
检修入口标记	5.9	要求与可达辐射的类别相对应				
取消功能联锁标记	5.9.2	要求在确定的条件下与所有激光照射的类别相对应				
用户资料	6.1	操作手册必须包括安全使用说明				
未购及检修说明	6.2	推销小册子必须带有分类标记；检修手册必须包括安全说明				
医用产品（参考 IEC 601-2-22）	7.1	要求专门的校准说明			要求专门的校准说明、测试手段和靶标指示器	
光学纤维（参考 IEC 60825-2）	7.2	若断开接点使防护罩不封闭，并会接触1类以上的激光辐射，则必须用工具才能断开光缆检修接头				

* 在 400 nm～700 nm 波长范围内，*AEL* 值不超过2类激光产品5倍的3B类激光产品，对摇控联锁连接器、钥匙开关、发射警告和衰减器的要求与对3A类激光产品的要求相同。

注：本表提供一个方便的要求一览表，完整的要求见标准正文。

表 D3 防护措施一览表

要求;条号 \ 分类	1类	2类	3A类	3B类*	4类
遥控联锁 10.2	无要求			连接房间和门窗	
钥匙开关 10.3	无要求			不用时拔出钥匙	
光束衰减器 10.4	无要求			使用过程中防止意外照射	
发射指示器	无要求			指示激光器处于激励状态	
警告标志 10.5	无要求			在警告标志上提出警告	
光路 10.6	无要求	在有用光路的末端终止光束			
镜反射 10.7	无要求			防止无意反射	
眼保护 10.8	无要求		若工程设计及管理措施不现实且超过 *MPE*，则需要眼防护		
防护服 10.9	无要求			有时需要	特别必要
培训 10.10	无要求		对所有操作人员及检修人员要求		

* 在 400 nm～700 nm 波长范围内，*AEL* 值不超过 2 类激光产品 5 倍的 3B 类激光产品，对摇控联锁连接器、钥匙开关、发射警告和衰减器的要求与对 3A 类激光产品的要求相同。

注：本表提供一个方便的防护措施一览表，完整的防护措施见标准正文。

附 录 E
（提示的附录）
专用于材料加工的激光产品的高功率激光器

E1 一般考虑

高功率激光辐射具有通过发热而改变激光束穿透或被反射的光学元件的形状、反射率、透射或折射率的潜在能力。因而能够畸变、反射和/或偏折激光辐射，且可永久损坏光学元件。此外，足够高功率辐射通过熔融、蒸发防护罩外壳材料，具有足以穿透该防护罩外壳的能力。其阈值依赖于激光的波长、峰值功率、照射时间及被照射材料的热变形和光学性质。环境因素，特别是空中灰尘，可增大激光辐射的吸收。原则上，任何 4 类激光器都能产生这样的效应。

安全方面遇到的一些效应为：

1）高功率激光辐射用熔化、蒸发、烧蚀，或其他方式穿透防护罩和/或产生有毒烟尘。

2）通过反射和传输光束的元件从高功率激光束吸收的有效能量，引起反射和传输光束改变性能（和由此产生漂移光束）的理由如下：

a）元件变形；

b）元件的总折射率和吸收系数引起的变化，热透镜是由 a)和/或 b)引起的效应；

c）元件表面吸收和/或反射引起的变化，尤其是多层电介质涂层容易被激光损坏；

d）严重损坏，即穿透（烧穿）不透明元件（例如镜子）或破坏透光元件（例如透镜）。

3）非线性效应，如倍频和受激布里渊散射。

E2 漂移激光辐射

E2.1 激光产品正常工作产生的漂移辐射包括光路元件的二次反射。然而，在正常工作、检修和维护

中,某些故障条件可引起产生比较强的漂移光束。这些情况包括:

——由激光辐射、环境或由机械碰撞对光束路径元件的损坏;

——光束路径元件未对准或位移(如由于振动、自动定位装置失效或控制软件失效);

——激光辐射在加工时穿透工件或不规则(强烈或再聚焦)的工件反射;

(检修后)光路元件未对准,或更换的光路元件或辐射挡屏失效。

E2.2 在所有上述条件下,建造能防止人员接触漂移激光辐射的防护罩不总是实际的或可取的。但为限制或防止E2.1所述的有些情况的发生,有许多工程设计方法可用。

措施包括:

——控制光路元件所处的环境(尤其是防止颗粒物和/或聚积在激光照射光路元件表面的颗粒物和/或凝结物);

——保证安装的光路元件其光学表面的机械变形最小,适当隔绝热应力和机械应力。

——限制元件支架不必要的自由移动;

——安装备用的机械制动器或限位开关,以防在防护罩内由于相对运动引起各部分之间相互碰撞;

——在防护罩内固定光路元件、元件的支架及任何挡屏,只有用工具才能移动它们;

——安装联锁装置以确保光路元件(特别是机械控制的部件,如光束开关)在工作前到位;

——监视激光功率的整个传输过程或从规定的激光束光路上的偏离;

——监视激光加工的某些方面,如光发射;

——用机械的方法限制接近激光加工区(如用一个屏板隔绝外部物体)。

E2.3 除上述工程特征外,说明书中必须限定产品的指定用途,例如,防止加工使镜反射强度大增或产生辐射聚焦的材料或表面曲率的工件。例如,限定使用未抛光的平面材料。所有限制都相应地在用户和产品信息中明确标出。

E3 防护罩的设计

E3.1 包含漂移激光辐射的防护罩可由被动和/或主动防护屏组成。被动防护屏依赖其构成材料防御耐激光辐射穿透的内在能力。主动防护屏结构用探测器或其他装置限制有害漂移辐射危害可能存在于防护罩内的时间能持久起防护罩的作用。主动保护不包括人在时监测和手动关闭激光器。

E3.2 被动防护屏

在熔融、切割和钻孔的激光产品中,对于正常工作和故障状态下,因激光辐射高度发射而在激光聚焦光学系统外产生的漂移辐射,非冷却的薄壁防护屏提供适宜的被动保护。

局部围封(如环绕激光束的管子或环绕工件加工区的档板)和处于重要位置的光阑(如工件下面和光束转动镜)能够加强防护罩提供的被动保护。采用局部围封之处,工作时应通过联锁或者保证其到位(需用工具才能移动)确保局部围封起作用。如果工作期间能确保其存在的话(如用近距离传感器),则任何不在规定光路的固体工件表面可以视为防护罩内光束围封的一部分。

E3.3 主动防护屏

在安全地超出电子(或其他)装置探测漂移激光辐射和使激光源关闭所需最长时间的时间内,主动防护屏必须能够承受入射到其表面的漂移激光辐射。这包括,例如:

——构成防护屏固有部分的探测器,依靠罩体被部分穿透而工作(例如,封装在双层表壁内的液体过压监测器);

——直接或通过温升等二次效应感测漂移激光辐射的探测器。

E4 光束终止器

光束终止器应该这样设计,使其工作在失效保护模式下和通过工程设计,防止在最大激光功率下完全穿透。后者可通过使用低挥发性/高导热性的结构材料,一个大吸收表面面积和/或安装与安全系统联

锁的热传感器而达到。

E5 其他条件

E5.1 应当关注激光产品产生的激光辐射对防护罩的完整性和与激光产品安全有关的所有信号或效用的连续性的影响(例如,防护罩内自动操作设备工作的电气或气动电缆),以及这些元件受激光照射引起燃烧和烟雾在内的相关危害。

E5.2 应当关注有关气体(例如用于促使激光靶子相互作用的氧气)和产生的烟雾等伴随危害。这些危害包括爆炸、起火、中毒和缺氧。

附 录 F

(提示的附录)

相 关 标 准

本附录列出了与机械和电气安全有关的其他文件,这些文件适用于激光器或发光二极管而且与本标准关联。

GB 8898—1997 电网电源供电的家用和类似一般用途的电子及有关设备的安全要求 (idt IEC 60065:1985)

GB 4793.1—1995 测量、控制和试验室用电气设备的安全要求——第1部分:通用要求 (idt IEC 61010-1:1990)

GB 4943—1995 信息技术设备(包括电气事务设备)的安全(IEC 60950:1991)

IEC 60204-1:1992 工业机械的电气设备 第1部分:通用要求

IEC 60601-1-22:1992 医用电气设备 第2部分:诊断和治疗用激光设备安全的特殊要求